

**INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL DE LA FOTOCATÁLISIS PARA LA  
DEGRADACIÓN COMPUESTOS ORGÁNICOS TÓXICOS Y/O REFRACTARIOS  
EN MEDIOS ACUOSOS Y LAS APLICACIONES ADELANTADAS EN EL  
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN FOTOCATÁLISIS Y ESTADO SÓLIDO  
(GIFES)**

**YESSICA ANDREA FALLA ARBOLEDA  
Código: 1087551443**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE TECNOLOGÍA  
ESCUELA DE QUÍMICA  
PEREIRA  
2016**

**INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL DE LA FOTOCATÁLISIS PARA LA  
DEGRADACIÓN COMPUESTOS ORGÁNICOS TÓXICOS Y/O REFRACTARIOS  
EN MEDIOS ACUOSOS Y LAS APLICACIONES ADELANTADAS EN EL  
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN FOTOCATÁLISIS Y ESTADO SÓLIDO  
(GIFES)**

**YESSICA ANDREA FALLA ARBOLEDA**

**Trabajo de grado para optar el título de:  
Químico Industrial**

**Director:  
VLADIMIR ARIAS RAMÍREZ  
MSc en QUÍMICA**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE TECNOLOGÍA  
ESCUELA DE QUÍMICA  
PEREIRA  
2016**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

Presidente del jurado

---

Jurado

---

Jurado

## **DEDICATORIA**

Los alcances de la memoria se pueden compartir con quienes han hecho parte de ella, el valor de lo que alguna vez fue sólo pensamiento ahora se materializa, esto se lo debo a aquellas personas que hacen parte de mi vida, a ellos les dedico el resultado de ésta investigación.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi Asesor VLADIMIR ARIAS RAMÍREZ, por su compromiso e interés en éste trabajo de grado, por el tiempo y conocimiento que me aportó, por su paciencia y su constancia, no sería posible la culminación de este trabajo sin su ayuda. Gracias!

A HOOVER ALBEIRO VALENCIA, director de GIFES y de la Escuela de Química, por su profesionalismo y su orientación acertada cuando fue prudente, por su excelente labor como director de la Escuela, pensando en la excelencia académica y sobre todo por su valor HUMANO.

A todos mis profesores de los que guardo mi mayor admiración y gratitud, no solo por el conocimiento que me brindaron sino por las enseñanzas que como ser humano y profesional llevo a todas partes: LUIS GUILLERMO RIOS, MELVIN DURAN, FELIPE ARCILA, RODRIGO LONDOÑO, JOSE RAUL LOAIZA y todos los profesores de la Escuela de química.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
1. DEFINICIÓN PROBLEMA .....	2
1.1. PLANTEAMIENTO.....	2
1.2. FORMULACIÓN .....	3
2. JUSTIFICACIÓN.....	4
3. OBJETIVOS.....	5
3.1. OBJETIVO GENERAL .....	5
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
4. METODOLOGÍA .....	6
4.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	6
4.2. FUENTES DE INFORMACIÓN.....	6
4.3. FASES DE LA INVESTIGACIÓN.....	7
4.4. INVESTIGACIONES REALIZADAS POR GIFES .....	11
5. GENERALIDADES .....	12
5.1. GENERALIDADES SOBRE EL AGUA .....	12
5.1.1.1. Definición de calidad del Agua.....	16
5.1.2. Normatividad sobre el agua.....	17
5.1.2.1. Normatividad sobre la calidad del agua potable .....	18
5.1.2.2. Normatividad sobre usos del agua y residuos líquidos.....	18
5.1.3. Tratamiento de agua. ....	19
5.1. PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA (POA'S) .....	20
6. FUNDAMENTOS FOTOCATÁLISIS .....	24
6.1. FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA .....	24
6.1.1. Semiconductores: fotocatalizadores.....	24
6.1.1.1. Conductividad eléctrica.....	24
6.1.1.2. Teoría de bandas.....	25
6.1.1.3. Semiconductores extrínsecos.....	27
6.1.1.4. Reacciones redox con fotocatalizadores .....	29
6.1.1.5. Fotocalizador: TiO <sub>2</sub> .....	31
6.1.2. Procesos físicos y químicos en la fotocatalisis heterogénea.....	33

6.1.2.1.	Adsorción disociativa del agua .....	34
6.1.2.2.	Recombinación de portadores de carga .....	37
6.1.2.3.	Transporte y captura de portadores de cargas .....	39
6.1.2.4.	Transferencia de cargas y mecanismo de reacción.....	42
6.2.	FOTO FENTON .....	42
6.3.	METODOLOGÍAS ANALÍTICAS APLICADAS EN LA FOTOCATÁLISIS	44
6.3.1.	COT y DQO.....	48
6.3.2.	Análisis toxicidad.....	49
6.3.3.	Técnicas analíticas avanzadas.....	50
7.	INVESTIGACIONES DE GIFES .....	53
7.1.	INFORMACIÓN SOBRE GIFES .....	53
7.2.	INVESTIGACIONES REALIZADAS EN GIFES .....	54
7.3.	IDENTIFICACIÓN DE GRUPOS DE INVESTIGACIÓN SOBRE FOTOCATÁLISIS EN UNIVERSIDADES A NIVEL NACIONAL .....	57
8.	APLICACIONES INDUSTRIALES DE LA TÉCNICA PARA LA DEGRADACIÓN EN ALGUNOS COMPUESTOS TÓXICOS .....	60
8.1.	DEGRADACIÓN DE PLAGUICIDAS .....	60
8.2.	DEGRADACIÓN DE COLORANTES DE LA INDUSTRIA TEXTIL .....	63
8.3.	DESINFECCIÓN MEDIANTE FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA .....	66
9.	CONCLUSIONES .....	69
10.	RECOMENDACIONES.....	71
11.	ANEXOS.....	73
12.	BIBLIOGRAFÍA.....	93

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución global del agua .....	13
Figura 2. Usos alternativos del Agua (Mundial) .....	14
Figura 3. Usos Alternativos del agua .....	14
Figura 4. Usos alternativos del agua.....	14
Figura 5. Contribución de las actividades humanas en la descarga ambiental, modificando los ciclos biogeoquímicos. ....	15
Figura 6. Resumen sobre normatividad vigente de Calidad del agua potable en Colombia.....	18
Figura 7. Resumen normatividad usos del agua y residuos líquidos en Colombia	19
Figura 8. Procesos de oxidación avanzada. Fuente: (27) .....	22
Figura 9. Procesos de oxidación avanzada de acuerdo a caudal de efluente y COT. ....	23
Figura 10. Aplicación POA's y tratamiento biológicos .....	23
Figura 11. Diagrama de bandas de energías.....	26
Figura 12. Diagrama de bandas de energía de un semiconductor .....	27
Figura 13. Diagrama de bandas de energía de un semiconductor extrínseco tipo n .....	28
Figura 14. Diagrama de bandas de energía de un semiconductor extrínseco tipo p. ....	28
Figura 15. Potenciales de reducción de bandas de energía de algunos fotocatalizadores.....	30
Figura 16. Estructura cristalina del rutilio (a) y anatasa (b) .....	32
Figura 17. Procesos involucrados en fotocátalisis .....	34
Figura 18. Hidroxilación superficie $\text{TiO}_2$ (001) con agua.....	35
Figura 19. Destino de portadores de carga en el fotocatalizador.....	38
Figura 20. Trasferencia de electrones a través del $\text{TiO}_2$ .....	39



Figura 21. Mecanismo de oxidación fotocatalítica desde la superficie del $\text{TiO}_2$ .....	40
Figura 22. Esquema para la obtención de mejores métodos para la aplicación de la fotocátalisis solar. ....	44
Figura 23. Degradación compuesto orgánico clorados. ....	47
Figura 24. Degradación de Metomilo .....	48
Figura 25. Diseño experimental regeneración de plaguicidas con elevado potencial de lixiviado .....	62
Figura 26. Curva de relación K/S Vs longitud de onda para tinción con Reactivo Red 110 .....	65
Figura 27. Tintura con aguas tratada por fotocátalisis heterogénea solar. ....	66
Figura 28. Proceso para tratamiento de aguas contaminadas con colorantes textiles.....	66
Figura 29. Resultado desinfección <i>Salmonella</i> por Fotocatálisis heterogénea .....	68

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Tipología documental.....	7
Tabla 2. Protocolo de búsqueda de fuentes de información – fase heurística.....	8
Tabla 3. Recursos de información determinantes en la investigación .....	9
Tabla 4. Protocolo de revisión de documentación – fase heurística. ....	10
Tabla 5. Matriz de conceptos. ....	10
Tabla 6. Ficha bibliográfica de investigación.....	11
Tabla 7. Principales agentes contaminantes de las aguas. ....	16
Tabla 8. Niveles del tratamiento de aguas residuales.....	20
Tabla 9. Potencial de oxidación .....	21
Tabla 10. Clasificación de tipo de material de acuerdo a resistividad.....	25
Tabla 11. Semiconductores utilizados como fotocatalizadores.....	29
Tabla 12. Datos de las estructuras cristalinas del TiO <sub>2</sub> .....	31
Tabla 13. Ventajas y desventajas del TiO <sub>2</sub> como fotocatalizador .....	33
Tabla 14. Adsorción disociativa del agua en Ti <sub>2</sub> O <sub>9</sub> H <sub>10</sub> (anatasa 101).....	36
Tabla 15. Energía de adsorción del agua en superficies de (101) anatasa .....	36
Tabla 16. Tiempo de reacciones de fotoinducción.....	41
Tabla 17. Reacciones interfaciales en la fotocatálisis con TiO <sub>2</sub> . ....	42
Tabla 18. Reacciones Foto Fenton de oxidación en solución acuosa y pH ácido..	43
Tabla 19. Etapas metodológicas y métodos analíticos .....	46
Tabla 20. Métodos analíticos avanzados para la fotocatálisis .....	51
Tabla 21. Datos de básicos de GIFES en Colciencias.....	53
Tabla 22. Resumen de las sustancias estudias en GIFES .....	54

Tabla 23. Avances de investigaciones de GIFES .....	55
Tabla 24. Grupos de investigación sobre fotocátalisis a nivel nacional .....	57
Tabla 25. Clasificación química de plaguicidas.....	60
Tabla 26. Compilación de dificultades y condiciones adecuadas para degradación de plaguicidas por Fotocátalisis Solar heterogénea.....	63
Tabla 27. Matriz de valoración impactos ambientales proceso textil .....	64
Tabla 28. Ficha bibliográfica: Reinosa Osorio, 2009.....	73
Tabla 29. Ficha bibliográfica: Soto Arenas y López Flórez, 2009 .....	74
Tabla 30. Ficha bibliográfica: Ramírez Noreña, 2010 .....	75
Tabla 31. Ficha bibliográfica: Laina Agudelo, 2010 .....	76
Tabla 32. Ficha bibliográfica: Velásquez Salas, 2011.....	77
Tabla 33. Ficha bibliográfica: Carvajal Gómez y Jiménez Coqueco, 2012 .....	78
Tabla 34. Ficha bibliográfica: Arias Ortíz y Pizza Londoño, 2014.....	80
Tabla 35. Ficha bibliográfica: Cruz Betancurt y Torijano Mina, 2014).....	82
Tabla 36. Ficha bibliográfica: Peñaloza y Tobón Carvajal, 2014 .....	84
Tabla 37. Ficha bibliográfica: Baicue, 2015 .....	86
Tabla 38. Ficha bibliográfica Galvis y Osorio 2015. ....	87
Tabla 39. Ficha bibliográfica Hernández y Ramírez 2015.....	89
Tabla 40. Ficha bibliográfica Cárdenas 2015.....	91

## INTRODUCCIÓN

En la presente investigación documental se realizó un análisis por diferentes temáticas relacionadas con la fotocátalisis para la degradación de compuestos orgánicos; como primera medida, el lector encuentra un capítulo dedicado sobre generalidades (numeral 5.) donde se aborda el agua, haciendo hincapié sobre su disposición, calidad y tipos de tratamiento, también se realiza una importante revisión de la normatividad colombiana que aplica a las características de los vertimientos de agua y la calidad del agua potable que el estudiante o profesional en química debe tener como punto de partida en los resultados que espera en sus investigaciones sobre el tratamiento de agua mediante fotocátalisis. Además, en el mismo capítulo se hace una revisión de los Procesos de Oxidación Avanzados, fotoquímicos o no fotoquímicos.

Los conceptos abordados sobre la fotocátalisis para la degradación de compuestos orgánicos están pensados como una ayuda en el entendimiento de los resultados obtenidos experimentalmente en una aplicación de la técnica; conceptos como conductividad, propiedades redox de los fotocatalizadores, procesos físicos y químicos involucrados en la fotocátalisis heterogénea u homogénea, entre otros que pueden ser consultados en el numeral 6, permitirán realizar una interpretación de la técnica. Adicionalmente, en éste capítulo se mencionan métodos analíticos que se pueden emplear en las investigaciones.

Las investigaciones realizadas en GIFES también son estudiadas, clasificadas y analizadas en el presente trabajo, con el propósito de dar un punto de referencia a las futuras investigaciones en el grupo; se analizaron los alcances de las mismas y las oportunidades de mejora en cada investigación; además, se realizó una búsqueda de los grupos de investigación del país reportados en Colciencias que realizan investigación relacionada con la fotocátalisis, los cuales podrían ser aliados estratégicos para GIFES.

En el último capítulo, se da como ejemplo algunas aplicaciones de la técnica de fotocátalisis en procesos industriales, realizando una caracterización de los resultados más significativos, además de las observaciones a tener en cuenta.

## 1. DEFINICIÓN PROBLEMA

### 1.1. PLANTEAMIENTO

En la escuela de Química de la Universidad Tecnológica de Pereira se encuentra en actividad el Grupo en Investigación en Fotocatálisis y Estado Sólido (GIFES) el cual, cuenta con investigadores docentes y estudiantes de la Escuela de Química en los programas de Química Industrial (SNIES No.7943) y Tecnología Química (SNIES No.260). Este grupo tiene cinco propósitos en sus investigaciones<sup>1</sup>:

- Realizar estudios de fotodegradación de compuestos orgánicos tóxicos en medios acuosos por medio de fotocatalizadores usando luz solar.
- Sintetizar nuevos fotocatalizadores por distintos métodos para estado sólido.
- Caracterizar los nuevos materiales por medio de propiedades físicas.
- Refinar por el método de Rietveld las nuevas estructuras cristalinas obtenidas.
- Evaluar los nuevos fotocatalizadores en degradación de sustancias orgánicas y fotólisis de agua

La presente investigación documental, centra sus esfuerzos en relación al siguiente propósito: “Realizar estudios de fotodegradación de compuestos orgánicos tóxicos en medios acuosos por medio de fotocatalizadores usando luz solar”

GIFES requiere documentar sus investigaciones, y las encontradas en fuentes de información accesibles, en una monografía, para ser utilizada como guía de estudio, donde se describan además, los fundamentos teóricos de la técnica y las aplicaciones de la fotocatálisis para degradación de diferentes compuestos orgánicos tóxicos y/o refractarios en medios acuosos incluida las que pueda ser desarrolladas en futuras investigaciones.

---

<sup>1</sup> Proyecto educativo, Escuela de Química, Universidad Tecnológica de Pereira.  
[http://media.utp.edu.co/tecnologia-quimica/archivos/proyecto\\_educativo.pdf](http://media.utp.edu.co/tecnologia-quimica/archivos/proyecto_educativo.pdf)

Por otro lado, los diferentes trabajos de grado relacionados con el objetivo expuesto, se han enfocado, a la fecha, en el tratamiento de contaminantes orgánicos generados desde las prácticas de laboratorios de la Escuela y colorantes de efluentes de diferentes empresas en el eje cafetero. Actualmente, no se ha realizado una documentación disponible para los estudiantes y docentes del grupo, propósito que persigue éste proyecto de grado.

## **1.2. FORMULACIÓN**

¿Cuáles son los fundamentos teóricos, las aplicaciones y las investigaciones realizadas por GIFES de la degradación de compuestos orgánicos tóxicos, presentes en medio acuoso, mediante la fotocatalisis en fuentes de información accesibles en la biblioteca de la Universidad Tecnológica de Pereira?

## 2. JUSTIFICACIÓN

La generación de conocimiento en los estudios científicos, es de vital importancia para construir un ambiente académico dinámico; dicho conocimiento nace de los esfuerzos de grupos y semilleros de investigación de las diferentes facultades de las universidades. Las investigaciones realizadas en estos centros, deben estar disponibles para la comunidad académica o científica, a través de publicaciones en revistas especializadas, repositorios, libros, entre otros. La investigación documental, por su parte, propone el análisis, la interpretación y la confrontación de información científica (1), recolectada de manera metódica en un documento final o monografía que puede ser consultado por la comunidad científica. Este tipo de estudio da un panorama de los avances del tema de interés y los aspectos que pueden ser profundizados. Una investigación documental no tiene el fin de realizar un culto al plagio (2) sino, reivindicar y resaltar las realizadas por otros autores, además, puede ser aprovechada como herramienta pedagógica para el desarrollo integral de profesionales.

El producto de esta investigación, busca facilitar el acceso a información de manera precisa y confiable, que afiance el conocimiento sobre la fotocatalisis de compuestos orgánicos tóxicos y/o refractarios, asimismo, fija la posibilidad de ahondar en las investigaciones realizadas por GIFES y su línea de investigación, a fin de que el estudiante la utilice como herramienta de consulta durante el desarrollo de su tesis o trabajo de grado.

GIFES pretende realizar la implementación de algunas de sus investigaciones en las instalaciones de la Escuela de Química, pues, como se indicó con anterioridad, algunos de estos estudios refieren la degradación de compuestos orgánicos residuales de las prácticas de laboratorio de las asignaturas de los programas de Química Industrial y Tecnología Química, lo cual, disminuirá en gran medida, el impacto ambiental generado con los efluentes de la Escuela, de ahí, la importancia que GIFES cuente con recopilación de las investigaciones realizadas al momento.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Realizar una investigación documental de los fundamentos de la fotocatalisis para la degradación de compuestos orgánicos tóxicos y/o refractarios en medios acuosos y las aplicaciones adelantadas en el Grupo de Investigación en Fotocatálisis y Estado Sólido (GIFES) en fuentes de información accesibles en la biblioteca de la Universidad Tecnológica de Pereira.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Documentar los fundamentos teóricos de la técnica de Fotocatálisis en la degradación de compuestos orgánicos en medios acuosos.
- Identificar y analizar las investigaciones realizadas por GIFES sobre la Fotocatálisis.
- Identificar las aplicaciones industriales de la fotocatalisis en la degradación de diferentes tipos de compuestos orgánicos.



## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Se realizó una investigación documental, el autor (2) define que consiste en *“llevar a cabo un trabajo sistemático, objetivo, producto de la lectura, análisis y síntesis de la información producida por otros, para dar origen a una nueva información, con el sello del nuevo autor”* por lo que *“La monografía es el texto de información científica por medio del cual se dan a conocer los resultados de la investigación documental”*.

### 4.2. FUENTES DE INFORMACIÓN

Las fuentes de información pueden agruparse en fuentes primarias, secundarias y terciarias, en las que se agrupan los tipos de documentos (tipología documental). Esta investigación documental hizo uso de fuentes primarias y secundarias, por tratarse de fuentes más directas para su análisis e interpretación. Las fuentes de información se definen por Falcato 2001 (3) así:

*Fuentes primarias:* “contienen información original, producto de una investigación o de una actividad eminentemente creativa. Son fuentes destinadas a comunicar los resultados del conocimiento y de la creación”

*Fuentes secundarias:* “contienen información primaria reelaborada, sintetizada y reorganizada, o remiten a ella. Son fuentes especialmente diseñadas para facilitar y maximizar el acceso a las fuentes primarias o a sus contenidos”

*Fuentes terciarias:* “contienen información sobre las fuentes secundarias y remiten a ellas”

Los autores (4) organizan los documentos en cinco categorías, en la Tabla 1, se definen y relaciona con el tipo de fuente de información.

Tabla 1. Tipología documental

CATEGORIA	TIPOLOGIA DOCUMENTAL	TIPO DE FUENTE
Publicaciones unitarias	Monografías , libros	Primaria
Literatura gris	Avances de investigación, informes técnicos y de investigación, prepublicaciones o pre-prints, tesis, trabajos académicos, congresos.	Primaria
Publicaciones periódicas	Revistas electrónicas	Secundaria
Obras de referencia	Manuales, guías, estadística, etc.	Primaria
Fuentes de información bibliográfica	Bases de datos	Secundaria

Fuente: (4)

### 4.3. FASES DE LA INVESTIGACIÓN

**4.3.1. Fase Heurística.** Esta fase consistió en la búsqueda de información pertinente y disponible de acuerdo a criterios establecidos o ejes temáticos propuestos en la investigación. En esta primera fase se tuvo en cuenta la planificación, desarrollo de *protocolos de búsqueda y revisión* de fuentes de información para tener en consecuencia un documento final coherente y contextualizado (5).

Se implementó un protocolo de búsqueda y revisión de información para el desarrollo de todos los capítulos de ésta investigación. El protocolo está basado en los autores Barbosa Chacón, Jorge Winston, Barbosa Herrera, Juan Carlos, & Rodríguez Villabona, Margarita, 2013 y a las estrategias de búsquedas sugeridas por la Universidad de Alcalá (6). Ver Tabla 2 y 4.

Tabla 2. Protocolo de búsqueda de fuentes de información – fase heurística

PROTOCOLO DE BÚSQUEDA		
Idioma		Español e inglés.
Periodo de Tiempo		1990 a 2015. Publicaciones
Términos	Individuales	Fotocatálisis, $\text{TiO}_2$ , $\text{H}_2\text{O}_2$ , fotocatalizadores, fotodegradación, fotorreactores, catalizadores, degradación, colorantes, fenoles, halogenados, cianuro, plaguicidas, agua, contaminación, biodegradable, no biodegradable, mineralización.
	Combinación	Tecnologías de Oxidación avanzada, procesos de oxidación avanzados, Fotocatálisis heterogénea, fotocatálisis homogénea, Degradación de compuestos orgánicos, Fotocatálisis acuosa colectores solares, radiación solar, energía solar ultravioleta, tratamiento fotocatalítico de agua, reactor heliofotocatalítico, Foto-Fenton, cinética de reacción, química analítica, técnicas analíticas avanzadas, técnicas analíticas convencionales, análisis toxicidad agua, degradación de contaminantes orgánicos en fase acuosa.
Recursos de Información		<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <i>Base de datos:</i> ACS Publications, Digitalia, ProQuest, Science Direct, Scopus, Springer Link.</li> <li>➤ <i>Revistas electrónicas:</i> American Chemical Society, ScienceDirect, AppliedCatalysis B: Environmental, Scientia et Technica, entre otras.</li> <li>➤ <i>Libros electrónicos:</i> Bibliotechnia, ebooks, Ebrary.</li> <li>➤ <i>Recursos electrónicos:</i> Repositorios REUNIR, Red de Repositorios Latinoamericanos, Dialnet, Google académico, CiteSeer.</li> <li>➤ <i>Otros:</i> Trabajos de investigación pregrados y posgrados, memorias de eventos académicos, recursos bibliográfico de Universidades.</li> </ul>
Estrategias		<p>1) Realizar búsqueda a través de recurso bibliográfico disponible para estudiantes de la Universidad Tecnológica de Pereira en su página Web (<a href="http://biblioteca.utp.edu.co/">http://biblioteca.utp.edu.co/</a>)</p> <p>2) Realizar búsquedas sencillas y avanzadas, haciendo uso de operadores lógicos o booleanos.<sup>2</sup></p> <p>3) Realizar revisión de referencias bibliográficas y citaciones en documentos estudiados.</p> <p>4) Realizar búsquedas cuando se requiera en páginas oficiales de organizaciones reconocidas como Universidades, grupos de investigación, entidades gubernamentales, ONG's, entre otras.</p>

Fuente: Construcción propia basada en (5).

---

<sup>2</sup> Un operador Booleano se utilizan para realizar relaciones entre términos de búsqueda, permite identificar conceptos en los documentos; estos son OR, AND, NOT. Ver: <http://www2.uah.es/bibliotecaformacion/BECO/BUSQUEDADEINFORMACION/index.html>

La siguiente es la información de los recursos de información más determinantes en la consulta desarrollada en el presente trabajo, organizado en orden alfabético:

Tabla 3. Recursos de información determinantes en la investigación

Recurso	Página Web	Acceso
Alcaldía de Bogotá. Compilación de Normatividad, Doctrina y Jurisprudencia	<a href="http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/index.jsp">http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/index.jsp</a>	Abierto
American Chemical Society. ACS Publications	<a href="http://pubs.acs.org/">http://pubs.acs.org/</a>	Limitado
Base de datos Science direct	<a href="http://www.sciencedirect.com/">http://www.sciencedirect.com/</a>	
Base de datos Springer	<a href="http://link.springer.com">link.springer.com</a>	Limitado
Biblioteca Banco de la República- Seccional Pereira	<a href="http://www.banrepcultural.org/blaa/catalogo-en-linea">http://www.banrepcultural.org/blaa/catalogo-en-linea</a>	Abierto en sala. Recursos electrónicos limitado a socios.
Biblioteca digital. Universidad de Buenos Aires	<a href="http://digital.bl.fcen.uba.ar/">http://digital.bl.fcen.uba.ar/</a>	Abierto
Editorial Wiley	<a href="http://onlinelibrary.wiley.com/">http://onlinelibrary.wiley.com/</a>	Limitado
Google Académico	<a href="https://scholar.google.com.co/">https://scholar.google.com.co/</a>	Limitado
Google Libros	<a href="https://books.google.es/">https://books.google.es/</a>	Limitado
Librería online. Scielo	<a href="http://www.scielo.org/php/index.php">http://www.scielo.org/php/index.php</a>	Limitado
Plataforma de información Colciencias. ScienTI- Colombia	<a href="http://www.colciencias.gov.co/scienti">http://www.colciencias.gov.co/scienti</a>	Abierto
Plataforma solar de almería. Unidad de tratamientos solares de agua	<a href="http://www.psa.es/es/areas/tsa/index.php">http://www.psa.es/es/areas/tsa/index.php</a>	Abierto
Recursos electrónicos	<a href="http://biblioteca.utp.edu.co/">http://biblioteca.utp.edu.co/</a>	Limitado a estudiantes de la UTP
Repositorio institucional de la Pontificia Universidad Javeriana- Bogotá	<a href="https://repository.javeriana.edu.co/">https://repository.javeriana.edu.co/</a>	Abierto
Repositorio institucional de la Universidad de Murcia	<a href="https://digitum.um.es/jspui/">https://digitum.um.es/jspui/</a>	Abierto
Repositorio institucional Universidad Tecnológica de Pereira	<a href="http://repositorio.utp.edu.co/dspace/">http://repositorio.utp.edu.co/dspace/</a>	Abierto
Royal Society of Chemistry	<a href="http://pubs.rsc.org/">http://pubs.rsc.org/</a>	Limitado
Superintendencia de sociedades	<a href="http://www.supersociedades.gov.co">http://www.supersociedades.gov.co</a>	Abierto

El siguiente protocolo, establece una metodología para realizar la revisión de los documentos encontrados, determinado su pertinencia para uso como bibliografía en todos los temas desarrollados en el trabajo.

Tabla 4. Protocolo de revisión de documentación – fase heurística.

PROTOCOLO DE REVISIÓN	
Normas de revisión	<p>La información debe estar concordante al objetivo de estudio y a la pregunta de investigación.</p> <p>Realizar lectura de Título y resumen de las investigaciones para determinar la aplicación de criterios de inclusión y exclusión.</p> <p>Realizar búsqueda de trabajos similares al objetivo de este estudio.</p> <p>En caso de encontrarse disponible realizar la búsqueda de fuentes primarias referidas.</p>
Criterios de inclusión	<p>Referentes sobre ejes temáticos propuestos.</p> <p>Documentación relacionada a la pregunta de investigación "¿Cuál es la información pertinente y disponible relacionada con la Fotocatálisis solar de compuestos orgánicos en medios acuosos y el análisis de los estudios realizados por GIFES?".</p>
Criterios de exclusión	<p>Publicaciones que no estén relacionadas a la pregunta de investigación pese a que cuente con los términos de búsqueda.</p> <p>Publicaciones de fuentes primarias que no estén disponibles en los idiomas elegidos.</p> <p>Información que no esté referenciada o avalada por organizaciones académicas reconocidas.</p>
Estrategia de extracción de datos	Se utilizará Software para gestión de bibliografía (www.zotero.org) donde se adicionará notas y se organizará por temáticas a las que aplica.

**4.3.2. Fase Hermenéutica.** En esta fase se realizó el análisis de la información recolectada, se diseñaron ficheros bibliográficos apoyados en la herramienta *Zotero*®<sup>3</sup>, un Software de libre acceso para gestión de bibliografía, además de la realización de matrices de conceptos, los cuales permitieron la construcción de ideas a partir de las fuentes seleccionadas:

Tabla 5. Matriz de conceptos.

Categoría temática	Concepto	Autor(es)	Definición autor	Definición propia

<sup>3</sup> <https://www.zotero.org/>

Un objetivo de la matriz de conceptos es analizar las diferentes fuentes de información de acuerdo a categorías temáticas expuestas en un esquema numérico, la importancia de realizar este análisis es buscar sustentar una idea, concepto o resultado a través de varios autores, para finalmente realizar un análisis propio que fue expuesto en la Monografía.

#### 4.4. INVESTIGACIONES REALIZADAS POR GIFES

En el análisis de las investigaciones realizadas por GIFES, relacionadas con el objeto de este trabajo, se realizó una ficha bibliográfica, donde se sintetizó la información de la investigación o trabajo de grado de acuerdo a la Tabla 6. Basados en esta ficha se realizaron diferentes análisis de las investigaciones de GIFES.

Tabla 6. Ficha bibliográfica de investigación.

<b>DATOS DEL TRABAJO</b>	
Título de la publicación	
Fecha de publicación	
Autor/es	
Palabras clave	
Lugar de creación	
<b>ANÁLISIS TRABAJO</b>	
Descripción publicación	
Objetivo	
Anotaciones de metodología utilizada	
Resultados destacables	
Análisis del alcance de la investigación	
Conceptos abordados	
Publicaciones similares	

## 5. GENERALIDADES

### 5.1. GENERALIDADES SOBRE EL AGUA

El agua es el compuesto más común en el planeta, con ella empezó la vida y en ella se sostiene, se requiere en actividades cotidianas, es útil en todos los sectores industriales de transformación o extracción y es vital para el desarrollo de actividades agrícolas en la obtención de alimentos. Todos los beneficios que representa el agua tanto en las actividades antropogénicas como en el sostenimiento y equilibrio del planeta tierra y su biodiversidad, se deben a las propiedades químicas y físicas de esta molécula.

Pese a que el 79% de la superficie terrestre está cubierta por agua; el 97,5% de la misma es agua salada y solo el 2,5% es agua dulce. De este pequeño porcentaje el 68,7% está congelada en glaciales y el 0,8% como Permafrost<sup>4</sup>, por lo que solo el 30,5% está potencialmente disponible para el consumo humano, es decir, los recursos de agua dulce disponible es solo el 0,06% (ver Figura 1) (7). Es evidente, que aunque habitamos en el Planeta Azul, el agua de la que nos sustentamos es escasa, sin embargo, la escasez no es el único problema que se enfrenta la lucha por la disposición del recurso en todo el mundo; otros factores contribuyen en la crisis del agua; la pobreza, la desigualdad en las relaciones de poder, las políticas erradas o deficientes de la gestión del agua, el consumismo desmedido, la falta de inversión social, la falta de cultura y políticas relacionadas con la minimización del consumo y empleo y la contaminación son determinantes en la disposición de agua potable (8).

Alrededor de 1.100 millones de personas en el mundo carecen de instalaciones que permitan el abastecimiento de agua y 2.600 millones no tienen acceso a saneamiento para obtención de *agua potable, químicamente segura e inocua* (9), lo que tiene consecuencias sociales, económicas y de salubridad graves; es el caso de la escalofriante cifra dada por la Organización mundial de la salud y UNICEF en el 2015, donde revela que ocurren 1,8 millones muertes de niños cada año a causa de enfermedades como la diarrea, asociadas al consumo de agua de

---

<sup>4</sup> Permafrost: "Capa de suelo o roca en la que la temperatura ha permanecido constantemente por debajo de 0 °C durante, al menos, algunos años". Extraído de GLOSARIO HIDROLÓGICO INTERNACIONAL. Pág 247. <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002218/221862M.pdf>

mala calidad o sucia. En América latina, el 85% de la población cuenta con agua potable, pese a esta aliviadora cifra, las desigualdades sociales están muy marcadas, siendo las poblaciones rurales, con menor cantidad de habitantes, menos atractivas para la inversión en sistemas de tratamiento y potabilización.(11)

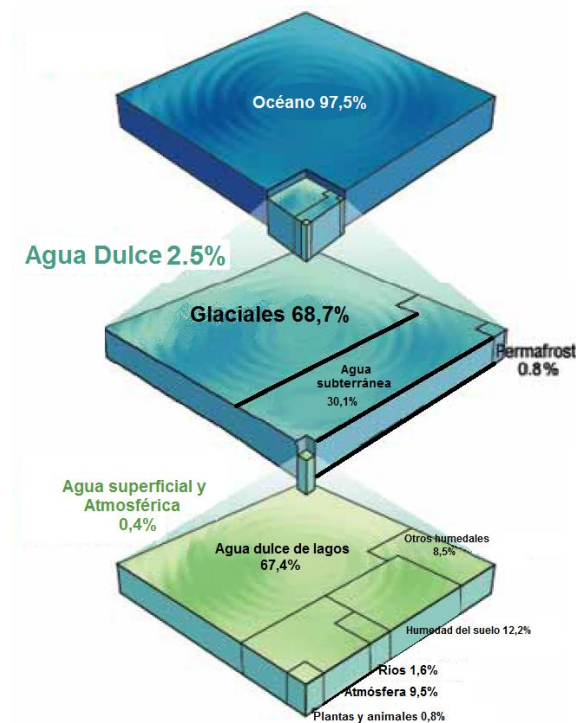


Figura 1. Distribución global del agua  
Fuente: (12)

La escasez y la falta de saneamiento del agua son aspectos que impactan directamente el desarrollo socio-económico de cualquier país. El Programa de las naciones unidas para el desarrollo en el informe sobre desarrollo humano-2006, enfatiza enérgicamente la responsabilidad del avance en la tecnología para enfrentar la crisis del agua en países en vía de desarrollo: *"A comienzos del siglo XXI, contamos con la financiación, la tecnología y las capacidades para hacer que la crisis del agua y el saneamiento pase a formar parte de la historia y podemos hacerlo de manera tan rotunda como lo hicieron hace un siglo los actuales países ricos"*.

Las actividades antropogénicas que implican el consumo de agua, pueden clasificarse en tres tipos: uso doméstico, uso agrícola y uso industrial. A nivel mundial, el sector agrícola representa el 70% del uso total del agua (ver Figura 2),



representando esto un consumo de 3200 km<sup>3</sup>/año, sin embargo, la proporción en el consumo varía entre países dependiendo de sus actividades, los países de ingresos elevados consumen más agua en el sector industrial y los de bajos ingresos utilizan mayoritariamente el agua en sus actividades agrícolas (9) (8) (Ver Figuras 3 y 4)

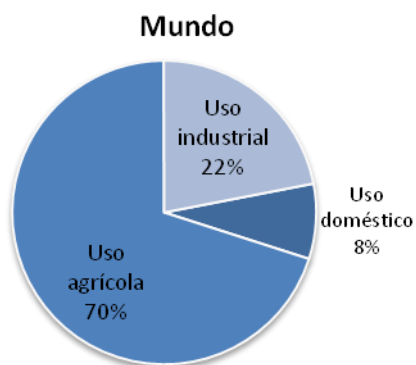


Figura 2. Usos alternativos del Agua (Mundial)  
Fuente: (9)

A nivel mundial, el sector industrial consume menos agua que el agrícola, sin embargo, se estima que en el año 1900 se utilizaba 6% del agua del mundo, incremento que en la actualidad es de 4 veces; cabe señalar, que este sector aporta significativamente a la contaminación de fuentes hídricas; investigaciones han declarado que el 70% de los desechos industriales en países en vía de desarrollo, no son tratados antes de su disposición (11), un agravante en la crisis del agua.

**Países de ingresos medios y bajos**

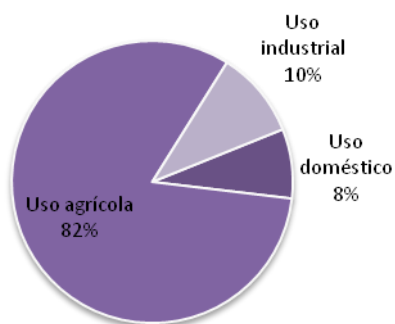


Figura 3. Usos Alternativos del agua  
(Países de ingresos medios y bajos)

**Países de ingresos elevados**

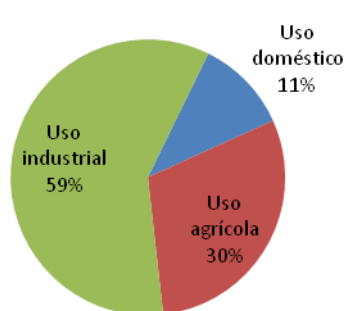


Figura 4. Usos alternativos del agua  
(Países de ingresos elevados)

Fuente: (9)

Desde el siglo XXI, el desarrollo de las actividades humanas como la agricultura, el transporte, los servicios públicos y el crecimiento demográfico ha crecido considerablemente (7) (13); incrementando, de este modo, la descarga de sustancias que contaminan el medio ambiente. Algunas de las sustancias que son descargadas diariamente como desecho se encuentran naturalmente en el medio ambiente, sin embargo, debido a su alta concentración no se autodepuran completamente en el ciclo químico natural. Las sustancias de origen sintético o *xenobióticas* que se descargan en el ambiente, representan un grado de contaminación alto, debido principalmente a la dificultad para degradarse naturalmente. En la Figura 5, se muestra la influencia de las diferentes actividades del hombre y las descargas de sustancias, en la modificación de los ciclos biogeoquímicos.

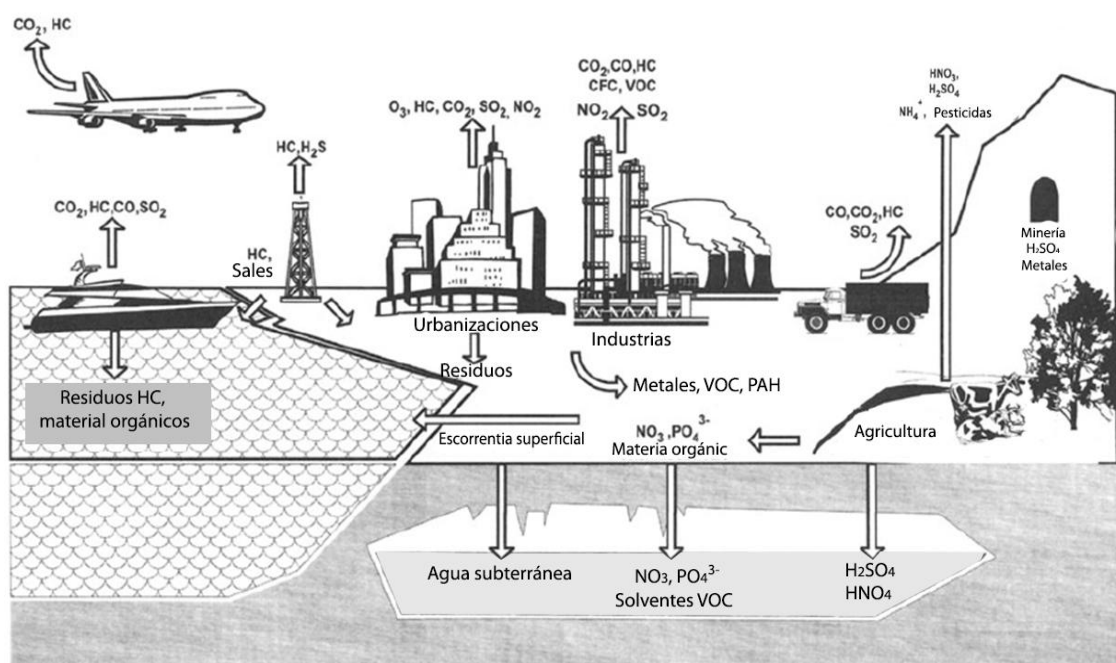


Figura 5. Contribución de las actividades humanas en la descarga ambiental, modificando los ciclos biogeoquímicos.

Fuente: (13)

Existen alrededor de cinco millones de sustancias químicas registradas, 70.000 son ampliamente usadas y 1.000 sustancias químicas se registran cada año (14); éste incremento en tecnología química ha suplido las necesidad de expansión industrial y la demanda de nuevos productos y servicios, sin embargo, la mayoría son sustancias tóxicas, es decir, pueden ocasionar daño a los microorganismos vivos como resultado de interacciones fisicoquímicas(15); algunas de estas sustancias tóxicas son no biodegradables, por lo que tratamientos convencionales

no ejercen ningún cambio en su condición de toxicidad, y , en algunas ocasiones, su implementación puede generar sustancias aún más peligrosas, tal es el caso de la formación de compuestos organoclorados al realizar desinfección (16). Por lo general, los compuestos tóxicos están en soluciones acuosas, y tienen una toxicidad elevada a bajas concentraciones, de éste modo, una pequeña cantidad de la sustancia puede contaminar grandes cuerpos de aguas (16). Además, los estudios sobre los efectos a largo plazo en la salud humana y el medio ambiente de éstas sustancias suelen ser escasos y en algunas ocasiones, no se tiene información sobre los efectos sinérgicos, debido principalmente a la complejidad y costos elevados de las investigaciones.(11). En la Tabla 7, se agrupan los tipos de contaminantes en las fuentes hídricas y los posibles efectos en el cuerpo hídrico.

Tabla 7. Principales agentes contaminantes de las aguas.

Constituyente	Principales parámetros representativos	Posible efecto contaminante
Sólidos en suspensión	Sólidos en suspensión Totales	*Problemas estéticos *Depósitos de lodo *Adsorción de contaminantes *Protección de patógenos
Materia orgánica biodegradable	Demanda Bioquímica de Oxígeno	*Consumo de oxígeno *Mortalidad de peces *Condiciones sépticas
Macronutrientes	Nitrógeno Fósforo	*Crecimiento excesivo de algas *Toxicidad para los peces (amoníaco) *Enfermedades en recién nacidos (nitrato) *Contaminación del agua subterránea
Organismos patógenos	Coliformes	*Enfermedades de transmisión hídrica
Materia orgánica no biodegradable	Pesticidas Algunos detergentes Productos farmacéuticos Otros	*Toxicidad (varios) *Espumas (detergentes) *Reducción de transferencia de oxígeno (detergentes) *Biodegradabilidad reducida o inexistente *Malos olores (ej.: fenoles)
Metales	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn	*Toxicidad *Inhibición de tratamientos biológicos de las aguas residuales *Problemas en la disposición de lodo en la agricultura *Contaminación del agua subterránea
Sólidos inorgánicos disueltos	Sólidos disueltos totales Conductividad eléctrica	*Salinidad excesiva - perjuicio a las plantaciones (irrigación) *Toxicidad a las plantas (algunos iones) *Problemas de permeabilidad del suelo (sodio)

Fuente. (17)

**5.1.1.1. Definición de calidad del Agua.** El concepto de calidad del agua es definida por el Decreto 1775 del 2007 de la legislación colombiana como: “Es el

resultado de comparar las características físicas, químicas y microbiológicas encontradas en el agua, con el contenido de las normas que regulan la materia”. Debido a la capacidad del agua a diluir y transportar diversidad de compuestos y partículas, su calidad varía de acuerdo a su uso o condición natural. La calidad del agua se puede dividir de acuerdo a su estado inicial, llamada calidad existente y a su calidad requerida o deseable (17).

La calidad existente se refiere a las propiedades con la que cuenta un *agua bruta*, es decir, la retirada de una fuente de abastecimiento; estas propiedades están afectadas por condiciones naturales como: el tipo de suelo en la cuenca y los minerales disueltos, el clima y las precipitaciones, además, puede verse influida por descargas puntuales de efluentes industriales o aguas residuales domésticas (17).

Por su parte, la calidad deseada o requerida se establece de acuerdo al *uso previsto*, por lo que las condiciones y atributos varían de acuerdo a los requerimientos del proceso industrial, doméstico o agrícola. (17) Además, la calidad deseable o requerida también se refiere a las condiciones con las que debe contar, de acuerdo a lo decretado por la ley, el agua residual tratada antes de su disposición final.

**5.1.2. Normatividad sobre el agua.** En Colombia, se establece y reglamenta los parámetros y características que debe tener el agua para ser considerada potable, además, de establecer los límites, sanciones y regulaciones del uso del agua y los residuos líquidos generados (vertimientos), con el fin de salvaguardar la salud de la población. Justamente, son las regulaciones, sanciones y controles exigidos desde la normatividad, las que permiten proteger el recurso hídrico y la salud de la población, debido a que impulsa a los diferentes sectores económicos a optimizar su consumo a través del diseño e implementación de operaciones y procesos más limpios y económicos; asimismo de promover el desarrollo de técnicas y metodologías eficaces e innovadoras en el tratamiento de agua potable o tratamiento de residuos líquidos, todo con el fin de hacer cumplir la norma y evitarse sanciones o cierre de actividades.

La normatividad y la exigencia en cuanto a la calidad del agua dadas por el estado y, reguladas y vigiladas por sus entes de control, ganan herramientas a medida que los avances científicos y tecnológicos lo hacen: la química analítica e instrumental, la microbiología, la medicina, la toxicología, la ingeniería ambiental y sanitaria, por mencionar algunas, son de vital importancia en la caracterización de sus atributos y sus efectos en la salud y el medio ambiente. Recae allí, la importancia por reconocerlas y entenderlas, pues es común que en el ejercicio

profesional, ya sea a nivel investigativo como el operativo o administrativo, sea necesaria aplicarla, evaluarla o controlarla.

**5.1.2.1. Normatividad sobre la calidad del agua potable.** La normatividad en Colombia sobre la calidad del agua se establece desde las leyes 09/79 y 715/01, las cuales establecen medidas sanitarias y organizan la prestación de los servicios de salud, dentro los que se encuentra la prestación del servicio de agua potable. Basado en dichas leyes se establece el Decreto 1575 de 2007, el cual, establece un sistema para la Protección y Control de la calidad del agua para Consumo Humano (agua Potable), en éste decreto, específicamente, los artículos 3º, 8º y 9º, y el artículo 14º se normalizan a través de la Resolución 2115 del 2007 y la Resolución 4715 de 2010 (ver Figura 6)

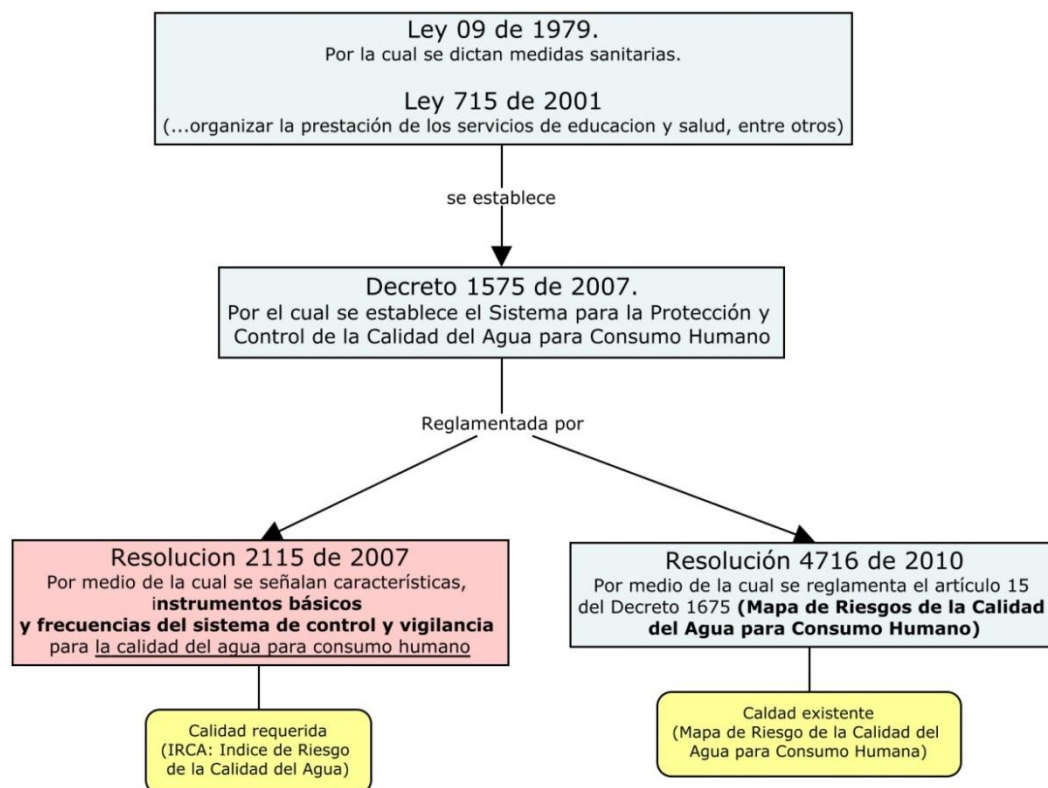


Figura 6. Resumen sobre normatividad vigente de Calidad del agua potable en Colombia

**5.1.2.2. Normatividad sobre usos del agua y residuos líquidos.** La normatividad Colombiana relacionada con estos dos aspectos, se resume en el flujograma de la Figura 7, en donde se describen las leyes, decretos y resoluciones de interés. Los avances en normatividad representan un gran logro, y

su cumplimiento, se convierte en un desafío para la comunidad científica, tecnológica y de los sectores industriales.

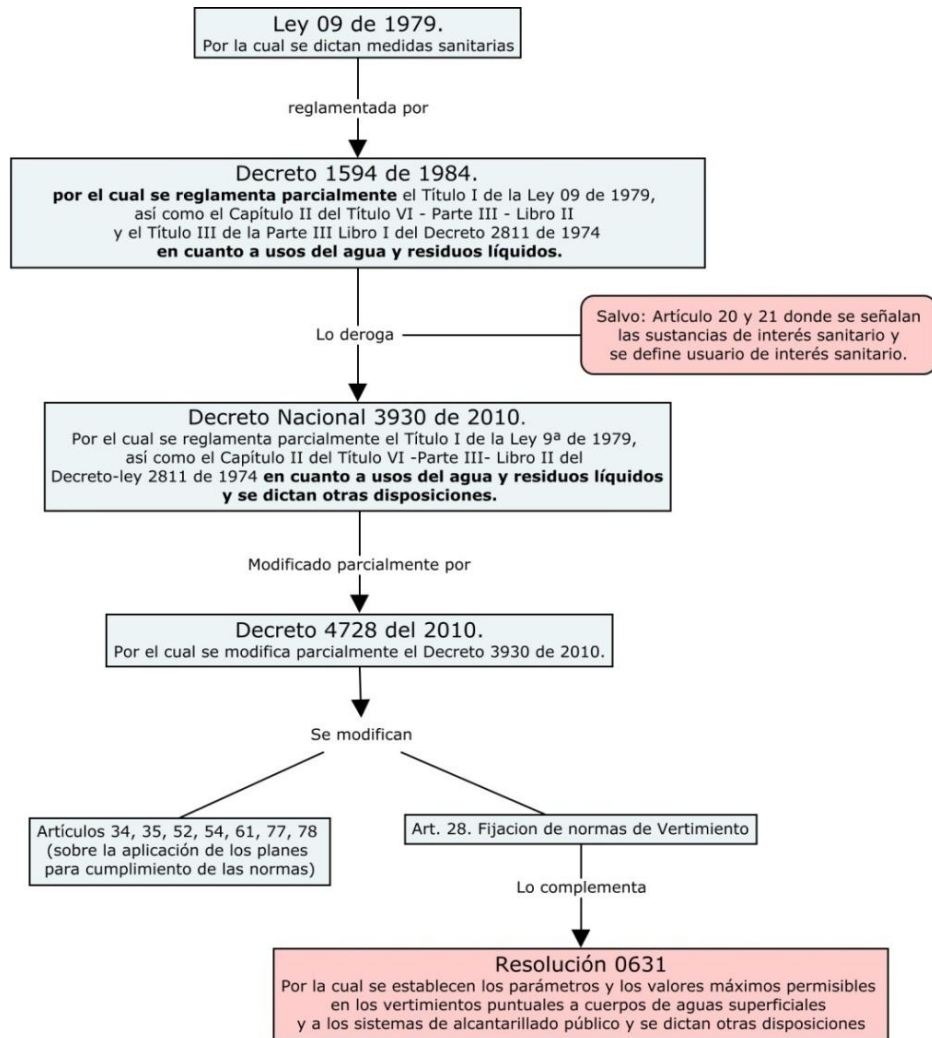


Figura 7. Resumen normatividad usos del agua y residuos líquidos en Colombia

**5.1.3. Tratamiento de agua.** Se conocen más de 150 diferentes tipos de tratamientos para agua dulce y salada (7), el objetivo de realizar un tratamiento es remover del cuerpo de agua impurezas o sustancias no deseables, los cuales son aspectos relativos al uso o la disposición del agua (calidad deseada), es decir, cuando se requiere agua para uso industrial, como en las calderas, es necesario entre varios aspectos una remoción de sustancias que generen incrustación y oxidación (18); en cambio, si lo que se requiere es tratar agua para consumo

humano, la actividad microbiana requiere ser controlada cuidadosamente por el bien de la salud pública (19). Además de estos aspectos, la calidad existente, la eficiencia de remoción deseada, la legislación, el impacto ambiental y el cuerpo receptor, deben ser tenidos en cuenta en el diseño de una planta de tratamiento (20) (21).

Los tratamientos de agua pueden dividirse en cuatro niveles: preliminar, primario, secundario y terciario. Estos se diferencian por el parámetro de calidad que remueven o trata, en la Tabla 8 se definen los niveles de tratamiento y el tipo de remoción que realizan. En adelante, se estudiará a profundidad el tratamiento de contaminantes orgánicos mediante la fotocátalisis solar, la cual hace parte de los Procesos de Oxidación Avanzada o PAO's por sus siglas en ingles.

Tabla 8. Niveles del tratamiento de aguas residuales.

Nivel	Parámetros de calidad	Remoción	Operaciones o procesos unitarios
Preliminar	<i>Físicos.</i>	Sólido en suspensión gruesos	Cribado, desarenador, ajuste de pH,
Primario		Sólidos en suspensión sedimentables, DBO en suspensión	Coagulación y floculación; sedimentación; flotación; tamizado; homogenización,
Secundario	<i>Biológicos.</i>	DBO en suspensión, DBO soluble	Lagunas de estabilización y sus variantes; procesos de digestión sobre el suelo Reactores anaeróbicos; lodos (fangos) activados y sus variantes; reactores aerobios con biopelícula
Terciario	<i>Químicos.</i> (contaminantes tóxicos, difícil de remover o persistentes).	Nutrientes, Organismos patógenos, Compuestos no biodegradables, Metales pesados, Sólidos inorgánicos disueltos, Sólidos en suspensión remanentes	Cloración; adsorción; intercambio iónico; ozonización; procesos con membrana; electrodiálisis; ultrafiltración; desinfección por radiación UV; procesos de oxidación convencionales; <u>Tecnologías o procesos de oxidación avanzada</u>

Fuente: (17) (22)

## 5.1. PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA (POA'S)

Existen diversos procesos convencionales que están enfocados a mejorar una característica de calidad del agua y que han sido ampliamente estudiados y aplicados en las plantas de tratamiento; sin embargo, el tratamiento de algunas

aguas residuales es ineficiente por métodos convencionales, por lo general por tratarse de aguas con una matriz de compuestos complejos, difícil de degradar por métodos biológicos o de oxidación química (23). Estos compuestos suelen ser altamente tóxicos para el medio ambiente y la salud humana. Actualmente, su tratamiento se basa primordialmente en darle una disposición como residuos peligrosos en rellenos especializados o en el traslado de una fase contaminada a otra, sin embargo, esta metodología no es una solución definitiva al problema ambiental y de salud. En éste sentido, se hace más evidente la necesidad de contar con tecnologías que logren la descontaminación o remediación de este tipo de efluentes.

Las Tecnologías o Procesos de Oxidación Avanzados (TOA's o POA's) (3)(17)(24) son técnicas que consisten en la generación de especies transitorias reactivas, con un alto potencial redox; principalmente el radical hidroxilo (25), cuyo potencial de oxidación es 2,8 V, la especie más reactiva después del Flúor (26) ver Tabla 9.

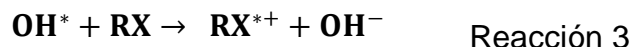
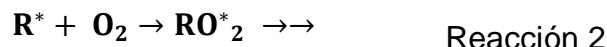
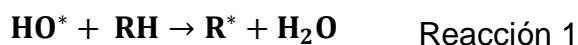
Tabla 9. Potencial de oxidación

<b>Especies</b>	<b>Potencial de oxidación (V)</b>
Flúor	3,03
Radical hidroxilo	2,8
Oxígeno atómico	2,42
Ozono	2,07
Peróxido de hidrógeno	1,78
Radical perhidroxilo	1,7
Permanganato	1,68
Dióxido de cloro	1,57
Ácido hipocloroso	1,49
Cloro	1,36
Bromo	1,09
Yodo	0,54

Fuente(26)

El radical hidroxilo tiene una baja selectividad y una alta velocidad de reacción, de  $10^7 - 10^{10} \text{ m}^{-1}\text{s}^{-1}$ . Esta característica permite tratar aguas con especies contaminantes múltiples y complejas. El radical hidroxilo reacciona con un compuesto orgánico extrayendo uno de sus hidrógenos, lo que forma un radical orgánico, que con el oxígeno molecular disponible como oxidante ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{KMnO}_4$ ) forma radicales peroxilo; la cadena de reacción continua hasta la oxidación completa a dióxido de carbono, agua y sales inorgánicas (26).





El objetivo de los POA's generar especies transitorias oxidantes como el radical hidroxilo (Reacción 1). Las tecnologías para lograr obtenerlo pueden agruparse en dos, los procesos Fotoquímicos y los no Fotoquímicos (ver Figura 8).

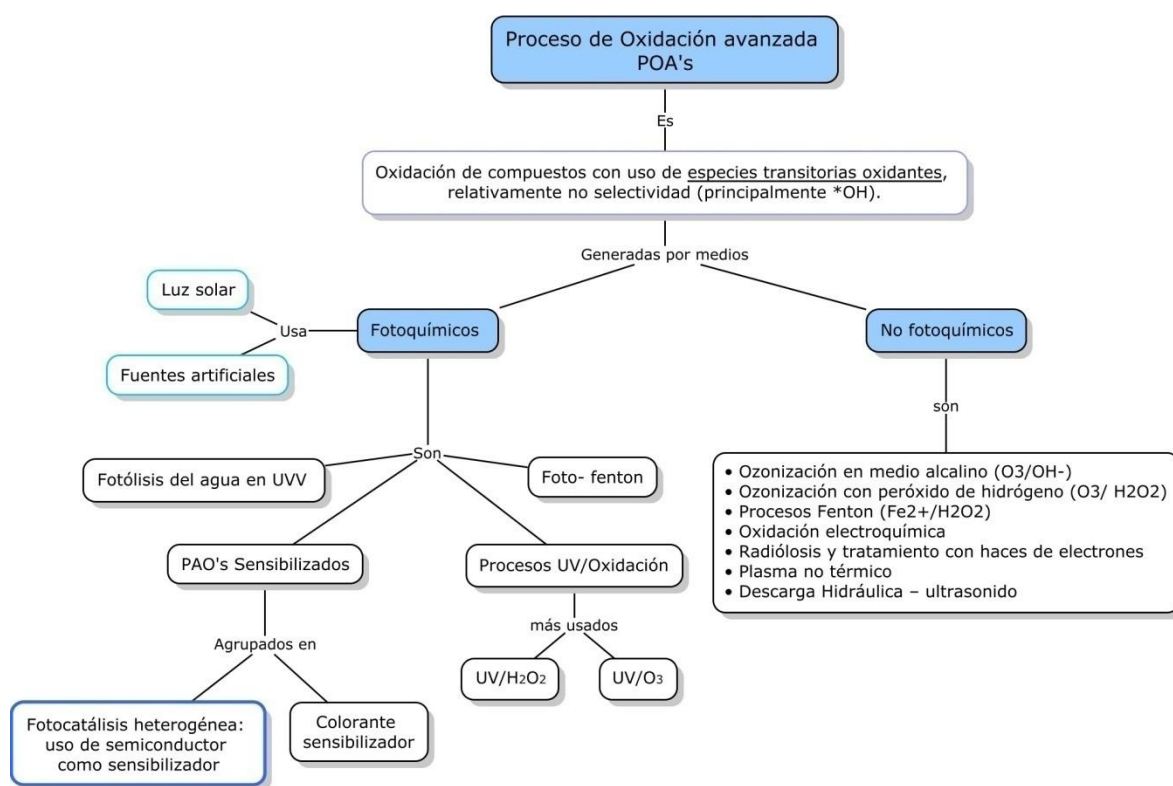


Figura 8. Procesos de oxidación avanzada. Fuente: (27)

Los procesos fotoquímicos requieren de radiación luminosa, estos procesos tienen velocidades de reacción más alta que las no fotoquímicas, y un bajo costo cuando se utiliza como fuente la luz solar, en vez de lámparas UV, por lo que se ha despertado un creciente interés en la investigación por tratarse además de una fuente de energía limpia (23).

Para realizar la implementación de un POA's deben tenerse entre otros las condiciones del proceso, como el caudal del efluente, su tipo de contaminación y carga orgánica, entre otros. Domenech, 2004 ilustra en la

Figura 9 las distintas tecnologías aplicadas con relación al caudal y el COT. Se puede observar que la sola aplicación de oxidación avanzada es eficiente aproximadamente hasta los  $3 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ , sin embargo este caudal puede ser mayor si se combina la aplicación con oxidación biológica.

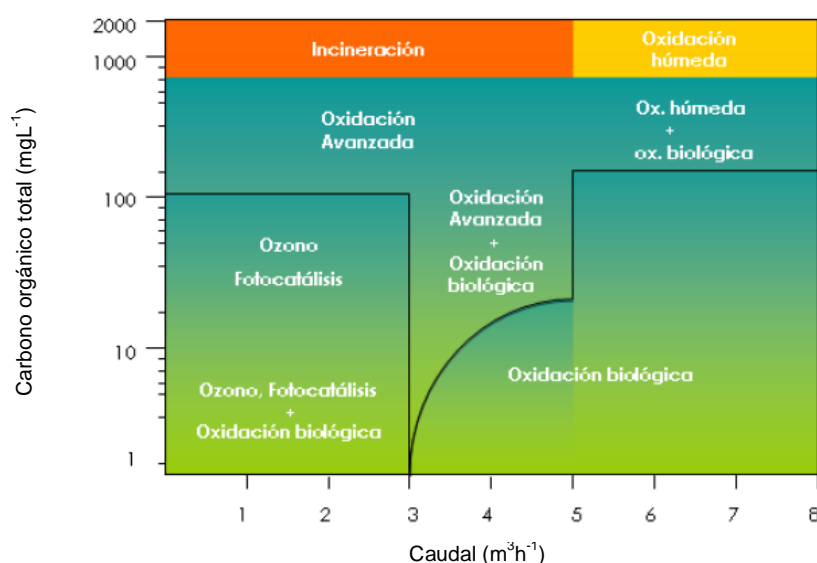


Figura 9. Procesos de oxidación avanzada de acuerdo a caudal de efluente y COT.  
Fuente: (21)

Los POA's pueden ser utilizadas como pretratamiento de la oxidación biológica, un sistema híbrido que debe ser estudiado de de manera particular. Básicamente, lo que se espera cuando se realiza ésta combinación es obtener productos intermedios menos refractarios o biodegradables que, al ser tratados biológicamente, lleguen hasta la mineralización de los mismos (25)(28). Las ventajas de éstas aplicaciones es la reducción de costos por la aplicación de POA's. En la Figura 10 se ilustra la ruta para ésta aplicación.

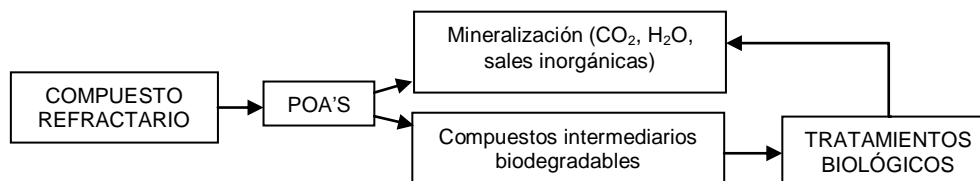


Figura 10. Aplicación POA's y tratamiento biológicos

## 6. FUNDAMENTOS FOTOCATÁLISIS

La fotocatalisis tiene tres principales conversiones fotoquímicas: la división fotocatalítica del agua, la destrucción de contaminantes orgánicos y la síntesis de compuestos (29) (30) (31). La fotocatalisis heterogénea es una técnica muy versátil, pues puede aplicarse en diferentes fases: gaseosa, líquida de compuestos orgánicos puros y soluciones acuosas; sin embargo, ésta se postula principalmente como una de las tecnologías de oxidación avanzada más importante para el tratamiento y purificación de aire y agua, pues ha generado resultados importantes con relación a los tratamientos convencionales en cuanto a destrucción de contaminantes (26) (30) (32), pese a que aún representa retos en aplicaciones reales (27).

### 6.1. FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA

La fotocatalisis heterogénea es similar a la catálisis heterogénea, se diferencian en la manera como el catalizador es activado; en la fotocatalisis por la absorción de un fotón y en la catálisis heterogénea, la activación del catalizador es térmica (32) (33). Antes de describir que procesos suceden en la fotocatalisis heterogénea, será necesario estudiar la naturaleza y química de los fotocatalizadores, con el fin de entender cuáles son las reacciones que se ven involucradas por su influencia.

**6.1.1. Semiconductores: fotocatalizadores.** Los sólidos tienen una estructura electrónica diferente a la de los líquidos o gases, esto se debe principalmente a la proximidad de sus átomos. Los sólidos pueden clasificarse según su conductividad como conductores, aislantes o semiconductores (34), algunos de los semiconductores son utilizados en dispositivos electrónicos, sin embargo, se han estudiado para aplicación como catalizadores. Algunas de sus características y propiedades eléctricas serán estudiadas a continuación.

**6.1.1.1. Conductividad eléctrica.** La conductividad  $\sigma$ , es una propiedad eléctrica de los sólidos o materiales, está inversamente relacionada con la resistividad  $\rho$ , determinada para cada material. La ley de Ohm (Ecuación 1) establece que la intensidad de corriente  $I$ , es proporcional a la diferencia de potencial  $V$ , aplicada a un material conductivo, cuyo factor de proporcionalidad es la resistencia  $R$ , del material. Si se aplica un voltaje constante a diferentes materiales, la intensidad de corriente medida cambia entre cada uno. en las Ecuaciones 1 y 2 se establece que la intensidad de corriente es inversamente

proporcional a la resistencia, y que a su vez la resistencia del sólido es proporcional a su resistividad  $\rho$ , que como se mencionó antes, es propia de cada material. Según la Ecuación 3 la resistividad es inversamente proporcional al número de electrones de conducción por unidad de volumen  $n$ , la movilidad de los electrones  $\mu$  y la carga  $e$  (35).

$$I = \frac{V}{R} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$R = \frac{\rho * l}{A} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\rho = \frac{1}{ne\mu} \quad \text{Ecuación 3}$$

La conductividad por su parte, es inversamente proporcional a la resistividad del material; por lo tanto, cuantos más electrones de valencia con capacidad de moverse hallan en el sólido, habrá más conductividad en la red cristalina:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = ne\mu \quad \text{Ecuación 4}$$

En la Tabla 10 se clasifican los materiales de acuerdo a su resistividad y se hace una relación con su capacidad de conducción.

Tabla 10. Clasificación de tipo de material de acuerdo a resistividad

Tipo de material	Resistividad $\rho$ [ ohm*cm]
Aislante	$\rho > 10^9$
Conductor	$\rho < 10^{-3}$
Semiconductores	$10^{-3} < \rho < 10^3$

Fuente: (36)

**6.1.1.2. Teoría de bandas.** Si se observa un átomo aislado, sus electrones se encuentran distribuidos en los estados de energía establecidos, ocupando en orden desde el nivel más bajo al más alto (principio de Pauli), por ejemplo, el

Sodio, tiene una configuración electrónica  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$ ; los electrones de los niveles 1 y 2 están firmemente ligados al núcleo, por tanto, no participan en ninguna reacción. En cambio el electrón del nivel 3, se conoce como electrón de valencia, pues puede participar en enlaces con otros átomos. Ésta configuración es válida para cada átomo separado, supongamos N átomos y un nivel particular de energía, a medida que el radio entre los núcleos de los átomos disminuye, el nivel particular de cada átomo se desdobra y se forman N niveles de energía muy próximos entre sí, por lo tanto, el nivel resultante se le llama *ancho de banda*.

Por encima de las *bandas de valencia* ( $E_v$ ) donde se encuentran los electrones disponibles para reaccionar, hay estados de energía completamente vacíos, que forman bandas de energía llamadas *bandas de conducción* ( $E_c$ ). La brecha energética, entre la banda de valencia y la banda de conducción en donde no existe la probabilidad de encontrar electrones, se le conoce como *banda prohibida* o *band gap* y su energía corresponde a  $E_g$  (ver Figura 11).

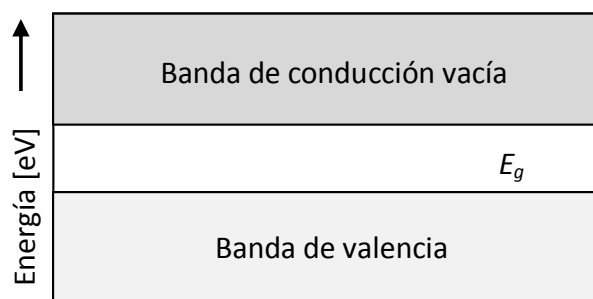


Figura 11. Diagrama de bandas de energías

La conducción de electrones ocurre cuando un electrón de la banda de valencia gana energía y se desplaza hasta la banda de conducción, donde se mueve libremente formando una especie de nube electrónica. En los metales, las bandas de conducción y de valencia están sobrepuestas por lo que el electrón se desplaza a través de ella libremente. Los semiconductores y los aislantes, se diferencian en el valor de su  $E_g$ , los primeros no supera los 2eV (33) y los aislantes están por encima. La promoción del electrón de valencia a la banda de conducción, en la fotocatalisis, se da por la absorción de un fotón, pero su energía debe ser mayor a  $E_g$ , o no será posible un movimiento electrónico. La longitud de onda del fotón que puede ser absorbido corresponde a:

$$\lambda = \frac{E_g}{hc} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde h es la constante de Planck y c es la velocidad de la luz.

A una temperatura de 0K los niveles de energía de la banda de valencia en los semiconductores y aislantes están completamente llenos y no se puedan generar conducción; sin embargo, al proporcionar energía suficiente a un semiconductor, los electrones de valencia pueden saltar hasta la banda de conducción, pues su *band gap* es relativamente más pequeña que en los aislantes. El movimiento de éste electrón deja en la banda de valencia un espacio vacío denominado *hueco* o *agujero* que por no tener electrones es de carga positiva (ver Figura 12). Éste movimiento genera *portadores de carga* contrarias: la dupla de electrón- hueco y aunque es un fenómeno físico, promueve reacciones químicas en la fotocatalisis (34).

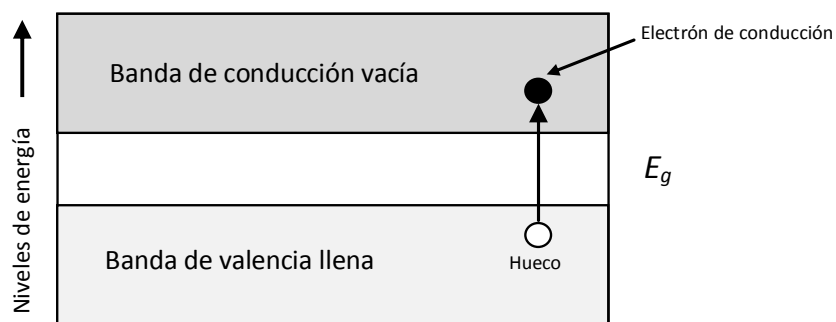


Figura 12. Diagrama de bandas de energía de un semiconductor

Los semiconductores pueden dividirse en dos, semiconductores elementales o intrínsecos y semiconductores extrínsecos. Los *semiconductores intrínsecos* son aquellos cuya conductividad no se ve afectada por ningún otro tipo de átomo, es decir, se trata de semiconductores con una alta pureza. Los *semiconductores extrínsecos*, por su parte, son aquellos que tienen en su estructura una proporción de impurezas de átomos adicionados a la red cristalina en concentración de entre 100 a 1000 ppm, lo que cambia algunas propiedades del semiconductor (34).

**6.1.1.3. Semiconductores extrínsecos.** Al procedimiento de adicionar un elemento al semiconductor se le denomina *dopaje* o *refinamiento*, y consiste en adicionar átomos de similar estructura electrónica a la del semiconductor. Los átomos adicionados pueden tener electrones que participen en la conducción o tener espacios en los orbitales atómicos que pueden ser ocupados por electrones promovidos desde niveles de energía más bajos en el semiconductor. Estos átomos se nombran como donadores o aceptores, respectivamente.

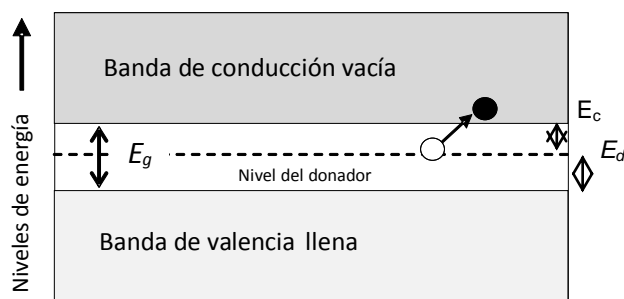


Figura 13. Diagrama de bandas de energía de un semiconductor extrínseco tipo n

Si se dopa con un átomo donador, el electrón adicional se encuentra en un nivel energético  $E_d$  por encima de la banda de valencia del semiconductor que lo aloja (ver Figura 13), la diferencia energética entre  $E_d$  y  $E_c$  se supera con mayor facilidad, dejando a su paso un hueco, que a su vez puede ser ocupado por un electrón de la banda de valencia, requiriendo menor energía, puesto que  $E_g > E_d$ ; a este tipo de dopaje se le denomina *tipo n* o negativo

Cuando se realiza un dopaje con un elemento aceptor de electrones, la conducción empieza por la promoción de electrones de valencia hacia el nivel de energía aceptor  $E_a$  y posteriormente, desde el nivel aceptor hasta la banda de conducción; estos semiconductores son llamados *tipo p* (ver Figura 14). Este dopaje es útil para aprovechar todos los fotones con menor energía que  $E_g$ , por tanto, aumenta la eficiencia de la energía fotónica que incide.

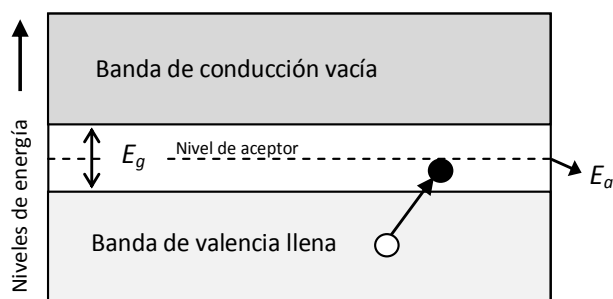


Figura 14. Diagrama de bandas de energía de un semiconductor extrínseco tipo p

Algunos de los semiconductores intrínsecos usados en la fotocatalisis tienen longitudes de onda (correspondientes a la energía de su salto de energía), dentro del espectro UV-visible, tal como se observa en la Tabla 11.

Tabla 11. Semiconductores utilizados como fotocatalizadores

Compuesto	Energía de salto de banda (eV)	$\lambda$ (nm)
GaAs	1,4	887
CdSe	1,7	730
CdO	2,1	590
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,2	565
GaP	2,3	540
CdS	2,5	497
WO <sub>3</sub>	2,8	443
TiO <sub>2</sub>	3,2	387
ZnO	3,2	390
BaTiO <sub>3</sub>	3,3	375
SrTiO <sub>3</sub>	3,4	365
ZnS	3,7	336
SnO <sub>2</sub>	3,9	318

Fuente: (16)

**6.1.1.4. Reacciones redox con fotocatalizadores.** Como se mencionó con anterioridad, el semiconductor en un estado de excitación (generación del par  $h^+/e^-$ ) puede involucrarse reacciones redox, el nivel de energía de la banda de valencia, determina la capacidad de los huecos para oxidar y el de la banda de conducción, la capacidad de reducción de los fotoelectrones (37). Relacionar cuantitativamente las banda de energía del semiconductor con su potencial redox ha sido un reto de químicos y físicos desde inicios de 1980 (38)(39). Los estudios involucraron entre otros los siguientes aspectos:

- El cálculo de la posición relativa de las bandas de conducción y valencia en una escala de energía absoluta como la escala de vacío<sup>5</sup>.
- Relacionar las escalas de energía de vacío (eV), a una escala de potenciales de reducción respecto al Electrodo Normal de Hidrógeno (ENH) en unidades de (V).

Para resolver el primer punto, se debe considerar el concepto de afinidad electrónica de un semiconductor, el cual se refiere a la energía en que un electrón desde el vacío (0eV) se incorpora al nivel inferior de la banda de conducción

---

<sup>5</sup> La escala de vacía la cual se refiere a la energía de un electrón en el vacío, lejos de la materia, convencionalmente se da el valor de 0eV y desciende a valores negativos por tratarse de pérdida de energía del electrón, hacia los estados de energía.



(40)(41). Conociendo el valor de la banda prohibida y el de la afinidad electrónica, se ubican a la escala de vacío, por ejemplo, el  $\text{TiO}_2$  tiene una afinidad electrónica aproximada de  $4,2\text{eV}$ , en la escala de vacío corresponde a  $-4,2\text{eV}$ , su *band gap* tiene un valor aproximado de  $3,2\text{eV}$ , por lo tanto, la ubicación de la banda de valencia del  $\text{TiO}_2$  se encuentra a  $-7,4\text{eV}$  en la escala de vacío, (ver Figura 15).

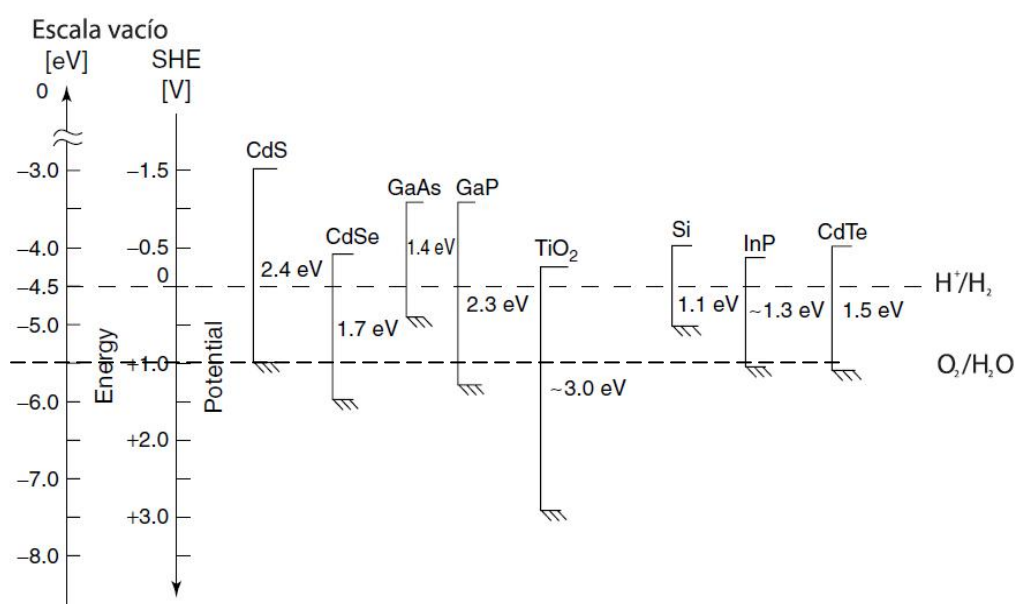


Figura 15. Potenciales de reducción de bandas de energía de algunos fotocatalizadores. Fuente: (42)

Para escalar el valor de las bandas de energía con su potencial de reducción, se realizó el cálculo del potencial de reducción del electrodo normal de hidrógeno (ENH), que por convención es 0V, en una escala de vacío (eV), llegando a un valor de  $-4,5\text{eV}$  (42). La siguiente ecuación permite realizar el cálculo de una escala a otra:

$$\text{Potencial escala absoluta (eV)} = -(\varepsilon^\circ + 4,5V)$$

En la Figura 15 se muestra las posiciones relativas de algunos semiconductores y su potencial de reducción, la utilidad de ésta gráfica es evaluar la capacidad de un fotocatalizador para reducir u oxidar frente a las especies o contaminantes en la solución acuosa, un ejemplo claro es la oxido-reducción del agua o de algunos oxidantes en solución como el peróxido de hidrógeno, el agua, puede ser reducida por un el electrón en la banda de conducción del  $\text{TiO}_2$  para la formación de  $\text{H}_2$  y en la banda de valencia, los huecos oxidan el agua formando  $\text{O}_2$ . Para que se puedan

dar estas reacciones redox con el agua, el nivel de energía de la banda de conducción (reducción) del semiconductor debe ser igual o más negativo que el potencial de reducción de  $H^+/H_2$  (0V) y el nivel de valencia (oxidación) debe ser igual o más positivo que el potencial de reducción de la dupla  $O_2/H_2O$  del agua (43) (33). Cabe aclarar además que los semiconductores *tipo n* tiene mayor densidad electrónica, por tanto, se promueve mayoritariamente reacciones de reducción y los *tipo p* las reacciones de oxidación(35).

Adicional a la capacidad para ser fotoactivado por luz preferiblemente UV-visible (<4,1 eV), al momento de elegir un semiconductor como fotocatalizador, se hace necesario tener en cuenta algunas características ideales en la aplicación de la fotocatálisis (31) (32) como lo es la resistencia a la fotocorrosión, tener baja toxicidad y tener suficientes sitios activos.

**6.1.1.5. Fotocalizador:  $TiO_2$ :** Éste es el más usado en la fotocatálisis para la degradación de contaminantes (30), cristaliza en tres principales estructuras: brookita, anatasa y rutilio, en la Tabla 12 se muestran los datos de estas estructuras. Como se observa en la Figura 16, el  $Ti^{+4}$  ocupa un hueco octaédrico enlazado a seis oxígenos, que a su vez, están unidos a 3 de titanio, el *rutilio* tiene una estructura tetragonal, el octaedro formado por  $TiO_6$  está ligeramente distorsionado, esta fase cristalina es estable termodinámicamente; la *anatasa* también tiene una distorsión en su octaedro  $TiO_6$ , ligeramente más grande que en el rutilio, a alta temperatura y presión, las fases anatasa y brookita se estabilizan en fase rutilio(37). En la Tabla 12 se muestran algunas propiedades de estas estructuras cristalinas.

Tabla 12. Datos de las estructuras cristalinas del  $TiO_2$

Propiedades	Rutilio	Anatasa	Brookita
Estructura cristalina	Tetragonal	Tetragonal	Ortorrómbica
Parámetros de red	a=4.5936 c= 2.9587	a= 3.784 c= 9.515	a= 9.184 b= 5.447 c= 5.154
Grupo espacial	$P4_2/mnm$	$I4_1/amd$	$Pbca$
Z= unidades fórmula por celda unitaria	2	2	4
Volumen /molécula ( $\text{\AA}^3$ )	31.2160	34.061	32.172
Densidad ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	4.13	3.79	3.99
Ti—O Longitud de enlace	1.949 (4) 1.980 (2)	1.937 (4) 1.965 (2)	1.87- 2.04
O—Ti—O ángulo de enlace	81,2° 90.0°	77.7° 92.6°	77.0° 105°
Band gap	3,03	3,20	-

Fuente: (37)

Las fases anatasa y rutilo tienen actividad fotocatalítica (44)(45), sin embargo, hay algunas características de ambas que hacen de la anatasa la preferida para aplicarla en procesos de fotocatálisis. En primer lugar, la anatasa tiene una mayor movilidad de electrones y baja densidad debido a su mayor distorsión que el rutilio, por otra parte, Yamada y Kanemitsu 2012 (46), demuestran que el tiempo de vida útil de los electrones fotogenerados es mayor en la fase cristalina anatasa que en el rutilio, concluyendo que en el rutilio se favorece la recombinación de los portadores de carga en el interior del semiconductor, por lo tanto, tiene menor eficiencia fotónica y menor posibilidad de que ocurran reacciones de oxidación; en cambio, en la anatasa, se generan más grupos OH superficiales producto de su hidroxilación con moléculas de agua, éstos grupos pueden atrapar los huecos, lo que aumenta el tiempo en que puede un hueco superficial hacer parte de procesos de oxidación.

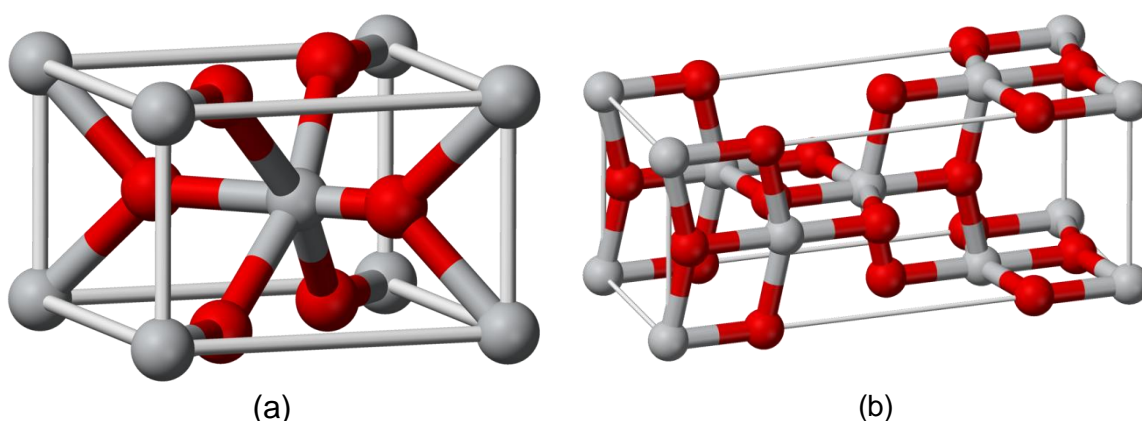


Figura 16. Estructura cristalina del rutilio (a) y anatasa (b) (O – rojo; Ti- gris)

Los fotocatalizadores pueden ser usados en suspensión o soportado. Cuando se usa en suspensión, se hace necesario realizar una recuperación del mismo. Para evitar gastos innecesarios, se pueden aplicar técnicas para soportarlo, sobre una superficie o sustrato inocuo y que no influya en la estructura del fotocatalizador. El uso de estos sustratos trae algunas desventajas que deben ser estudiadas, como lo es la disminución de los sitios activos en contacto con el medio, el envenenamiento del fotocatalizador, problemas de adherencia y pérdida de la eficiencia de la actividad fotocatalítica(47)(48). El  $\text{TiO}_2$  comercialmente más usado es el Degussa P-25® con una composición de 80/20 anatasa/rutilio, una área de  $55 \pm 15 \text{ m}^2/\text{g}$  y un tamaño de partícula entre 30-90 nm (49).

En este trabajo no se hará hincapié en los métodos ni en los resultados adversos o positivos del fotocatalizador soportado en la degradación de compuestos orgánicos, sin embargo, se ilustrará algunas ventajas y desventajas de usar el

TiO<sub>2</sub> (suspendido o soportado), en la fotocatalisis, aunque la información disponible en la literatura es amplia (47)(50), en la Tabla 13 se muestran unas ventajas y desventajas de usar el TiO<sub>2</sub> como fotocatalizador

Tabla 13. Ventajas y desventajas del TiO<sub>2</sub> como fotocatalizador

Ventajas	Desventajas
Barato, no es tóxico y es estable químicamente	Solo aprovecha aproximadamente el 5% del espectro total debido a que su <i>band gap</i> absorbe ondas menores a de 400 nm
Promueve oxidación a una temperatura ambiente	Sensible a la fotocorrosión anódica. Sin embargo, la reacción de oxidación del agua es más favorable, evitando en gran medida ésta fotocorrosión
Se puede conseguir la degradación completa de muchos contaminantes bajo condiciones de operación determinadas	En soluciones con alta concentración de iones causa coagulación, lo que disminuye los sitios activos disponible para reacción.
	Al usar nanopartículas para aumentar los sitios activos, se limita el rango de longitud de onda para la fotoexcitación. (porque)

Fuente: (47)(50)(35)

**6.1.2. Procesos físicos y químicos en la fotocatalisis heterogénea.** La fotocatalisis solar de compuestos orgánicos en medios acuosos tiene cuatro principales componentes: energía lumínica de activación (fotón), un semiconductor que funciona como catalizador debido a la generación de portadores de carga (electrón-hueco), una fase fluida, que para efectos de esta investigación es agua, y un contaminante. En este numeral estudiaremos los procesos físicos y las reacciones químicas que se involucran para lograr la degradación de contaminantes. Cabe advertir que de ahora en adelante se llamará al dióxido de titanio como el fotocatalizador, por ser el objeto principal de ésta investigación.

Los fenómenos que ocurren en fotocatalisis heterogénea puede dividirse en una serie de etapas que serán estudiadas a detalle, aclarando que aunque tienen un orden basado en algunos autores reseñados (32)(51)(52), ocurren de manera simultánea. La Figura 17 se ilustra los procesos físicos (1, 2, 4, 6 y 7) y químicos (3 y 5) involucrados.

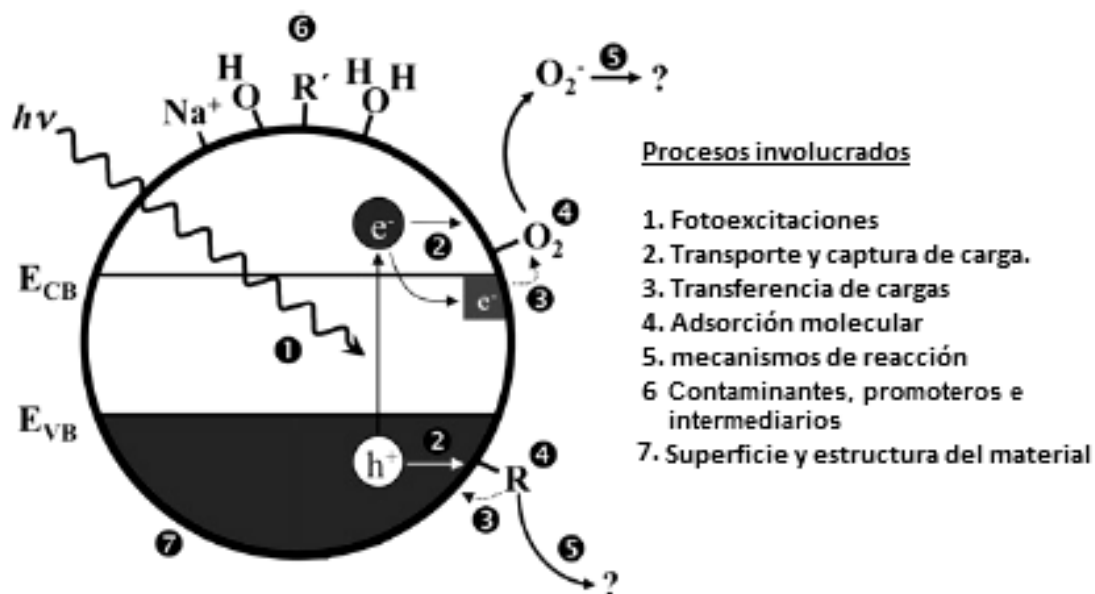


Figura 17. Procesos involucrados en fotocatalisis. Fuente: (51)

**6.1.2.1. Adsorción disociativa del agua.** Los estudios a través de modelos computacionales (53) y por análisis IR(54) han demostrado que en presencia de agua ocurre un fenómeno superficial llamado quimisorción o adsorción disociativa del agua, en donde la superficie del dióxido de titanio se hidroxila (35), los sitios preferidos para la adsorción y posterior disociación del agua molecular son los iones  $\text{Ti}^{+4}$  (53)(55), siendo el resultado de esta hidroxilación muy variado, pues depende, la relajación de la superficie y la temperatura (53)(56). Sin embargo, es posible ejemplificar éste fenómeno de una manera simple, tomado una superficie (001) de  $\text{TiO}_2$  (Figura 18).

En la literatura, se encuentra el  $\text{TiO}_2$  hidroxilado como  $-\text{Ti}^{\text{IV}}\text{OH}$  o como  $(\text{TiO}^{\text{IV}}-\text{O}^{2-}-\text{Ti}^{\text{IV}})-\text{OH}^-$  para los sitios A y B y  $(\text{TiO}^{\text{IV}}-\text{O}^{2-}-\text{Ti}^{\text{IV}})-\text{OH}_2$  refiriendo a los sitios C (ver Figura 18) (57). Estas fórmulas son bastante importantes, pues como se estudiarán en adelante, participan directamente en los procesos que llevan a la fotodegradación de compuestos.

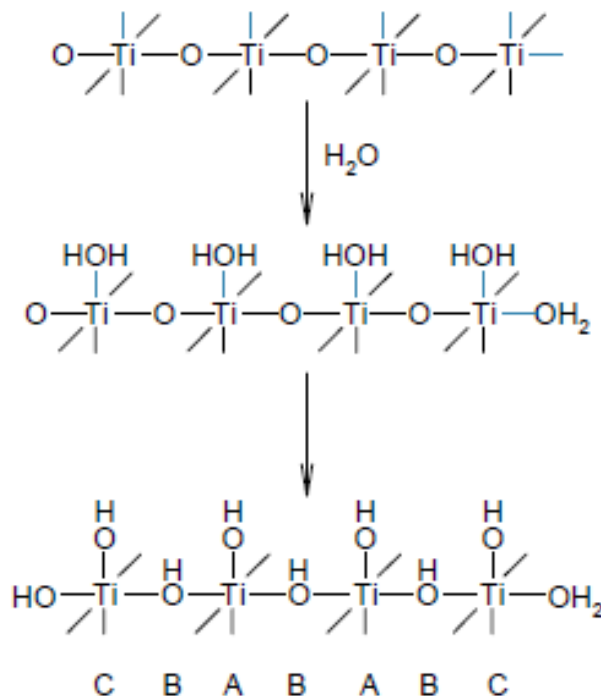


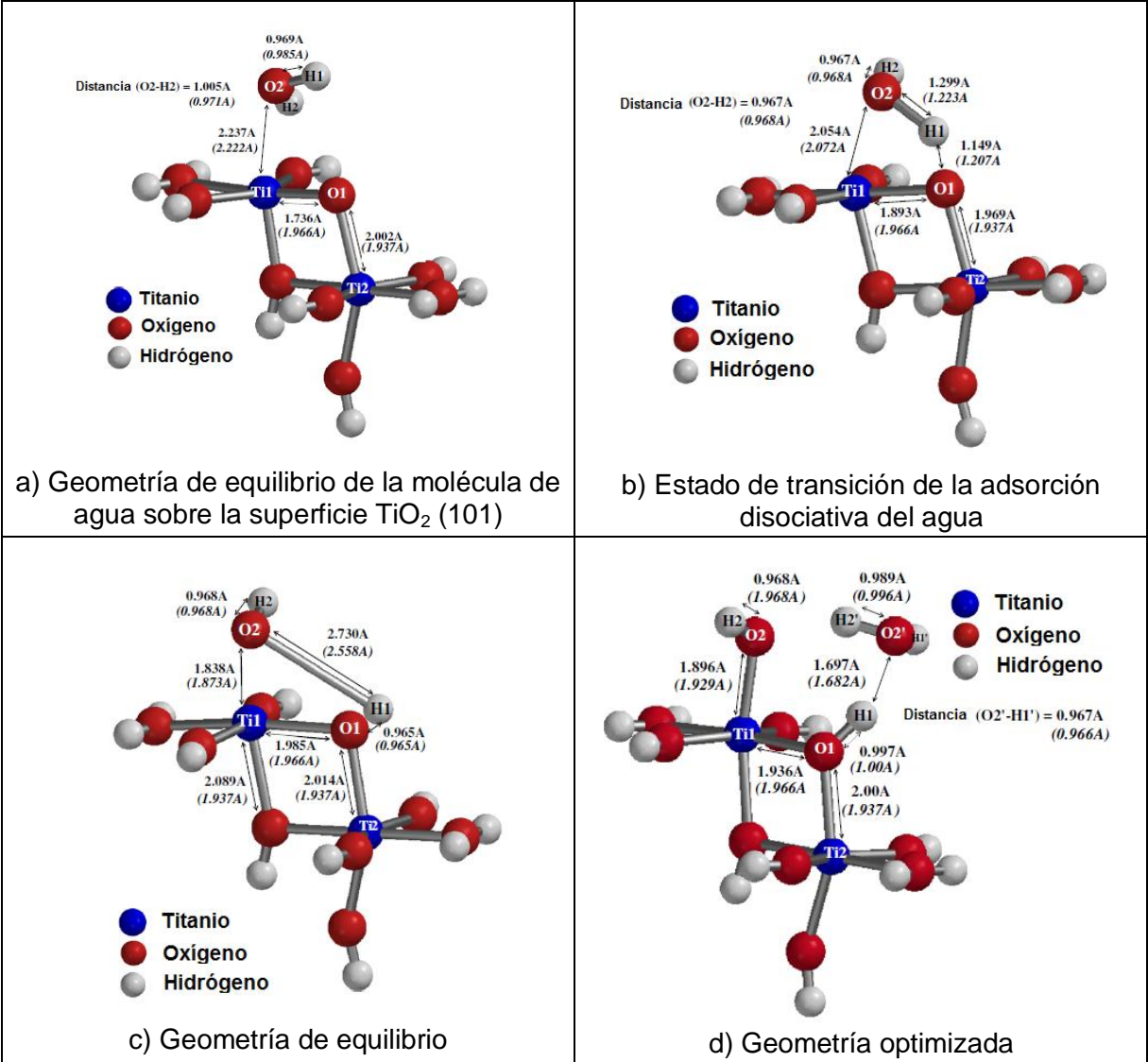
Figura 18. Hidroxilación superficie  $\text{TiO}_2$  (001) con agua.  
Fuente: (35)

El mecanismo de hidroxilación de la superficie se da secuencialmente a medida que se hidroxila completamente (54). Onal, Soyer y Senkan 2006 realizan una simulación computacional por el método DFT de la adsorción del agua sobre una superficie (101) parcialmente hidroxilada de la anatasa  $\text{Ti}_2\text{O}_9\text{H}_{10}$ , donde se estudió la adsorción de manera disociativa y molecular, para superficies relajadas y para las superficies fijas. En la Tabla 14 se muestran los pasos en los que se da la adsorción, aclarando que los datos entre paréntesis corresponde a las distancia de enlace de los grupos fijos y sin paréntesis a las superficies relajadas(53).

En el recuadro a) de la Tabla 14 se muestra el equilibrio en el que la molécula de agua tiene cuando se encuentra en la superficie (adsorción molecular), seguidamente, en la recuadro b) inicia un estado de transición, donde el enlace O-H la molécula de agua adsorbida, empieza a distorsionarse, el oxígeno se acerca al  $\text{Ti}^{\text{IV}}$  y el H al O y la distancia del enlace Ti-O aumenta; en el recuadro c) hay una geometría de equilibrio donde el OH del agua se encuentra cercano al  $\text{Ti}^{\text{IV}}$  y el H al O, formándose el enlace, finalmente, en el recuadro d) se muestra la geometría optimizada en el medio acuoso. Adicionalmente, en la Tabla 15 se muestran los datos de la energía de adsorción del agua en la anatasa (101) llegando a la conclusión que para el caso de las superficies relajadas se favorece mayormente

la adsorción molecular con una energía de adsorción de -25,08 kcal/mol y para superficies fijas, la adsorción disociativa del agua, con -28,97kcal/mol (53).

Tabla 14. Adsorción disociativa del agua en  $\text{Ti}_2\text{O}_9\text{H}_{10}$  (anatasa 101)



Fuente:(53)

Tabla 15. Energía de adsorción del agua en superficies de (101) anatasa

Superficie	Energía de adsorción [kcal/mol]	
	Molecular	Disociativa
101 Anatasa relajada	-25,08	-19,26
101 Anatasa fija	-28,97	-34,78

Fuente:(53)

Vale la pena resaltar un estudio reciente, realizado en el 2016 por Payne y col, donde se pudo estudiar los estados de energía generados por la fotoemisión de dos fotones (2PPE), a una superficie de  $\text{TiO}_2$ - rutilio hidroxilado por una delgada monocapa de agua. La técnica de 2PPE usada consiste en la emisión de pulsos láseres ultrarrápidos, donde, un primer fotón llamado “*pump*” se induce, causando un desplazamiento del electrón hacia un segundo nivel de energía y el segundo fotón denominado “*probe*” lo desplaza hacia un tercer nivel de energía. Los investigadores probaron la aparición de un estado de energía hidroxi-inducido en el segundo nivel de energía, que de acuerdo a los cálculos, se encuentra 2,7 eV por encima de la energía de Fermi. Sin embargo, al realizar una correlación utilizando un solo fotón de mayor energía y no dos como en el experimento inicial y con el fotocatalizador hidroxilado en agua, el nivel de energía antes detectado, es menor de lo esperado, éste fenómeno se debió a la influencia de la adsorción del agua en la superficie. Este descubrimiento indica que los hidroxilos, además de ser importante en la captura de cargas (como se estudiara a continuación), también genera estados excitados por encima del band gap accesibles a la fotocatálisis, de donde se pueden sugerir nuevas investigaciones (58)(59).

**6.1.2.2. Recombinación de portadores de carga.** Los portadores de carga una vez fotogenerados, pueden tener diferentes destinos y su estudio ha generado gran interés en la comunidad científica con el fin de establecer la influencia en la eficiencia fotónica de las reacciones. Uno de los destinos que puede tener un portador de carga es la rápida recombinación de pares  $e^-/h^+$  (<50ns) en diferentes zonas del fotocatalizador (60). El mecanismo específico de cómo sucede la recombinación en el fotocatalizador no es claro; es por ello que Bunsho Ohtani un importante investigador y profesor, recientemente publicó un artículo de revisión (61) en donde estimula la investigación de éste fenómeno, como un punto crítico en el entendimiento de la fotocatálisis, argumentando que aunque se dan indicios de cómo se ve o no favorecida, no hay un estudio que lo explique con claridad. En la Figura 19 se muestra los destinos de los portadores de carga dentro de la esfera del fotocatalizador; se ilustra algunos puntos en donde se da la recombinación de los portadores y los movimientos de cargas hasta la superficie.



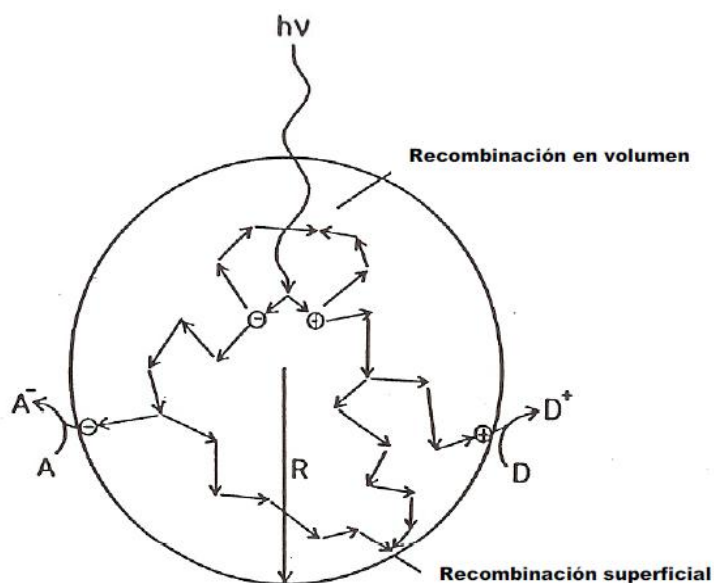


Figura 19. Destino de portadores de carga en el fotocatalizador. Fuente: (52)

Se enuncian a continuación algunos aspectos que influyen en la recombinación de los pares  $e^-/h^+$  fotogenerados:

- Los defectos superficiales y vacancias de oxígeno, forman estados de energía intermedios entre la *band gap* y la banda de conducción, que pueden ser sitios donde se recombinen los portadores (59).
- Algunos semiconductores tipo-n (que poseen un nivel de energía electrón-donor, debajo de la banda de conducción) son más propensos a recombinarse cuando están en soluciones con electrolitos, pues si el nivel de energía es mayor que potencial de electrodo de la solución electrolítica, el electrón se transfiere hacia el electrolito, dejando una deficiencia de electrones en el semiconductor tipo n, que se convierte en puntos de recombinación (61).
- Se ha demostrado que pese al efecto positivo del flujo radiante en la formación de portadores de carga; de acuerdo J. M. Herrmann, por encima de  $25 \text{ mW/cm}^2$  (52), la actividad fotocatalítica se vuelve ineficiente, debido a que los pares  $e^- / h^+$  está en “exceso” y se recombinan, por lo tanto, la velocidad de reacción no se compensa con el gasto de energía radiante.

**6.1.2.3. Transporte y captura de portadores de cargas.** El transporte de los portadores de carga en la estructura del fotocatalizador se ilustra en la Figura 19, el movimiento de estas cargas hasta la superficie a través de trampas de portadores de carga (51).

Los electrones se transportan a través de sitios  $Ti^{4+}$  hacia los  $Ti^{4+}$  más cercanos, como se muestra en la Figura 20. El paso del electrón cambia el número de oxidación del Ti de 4+ a 3+.

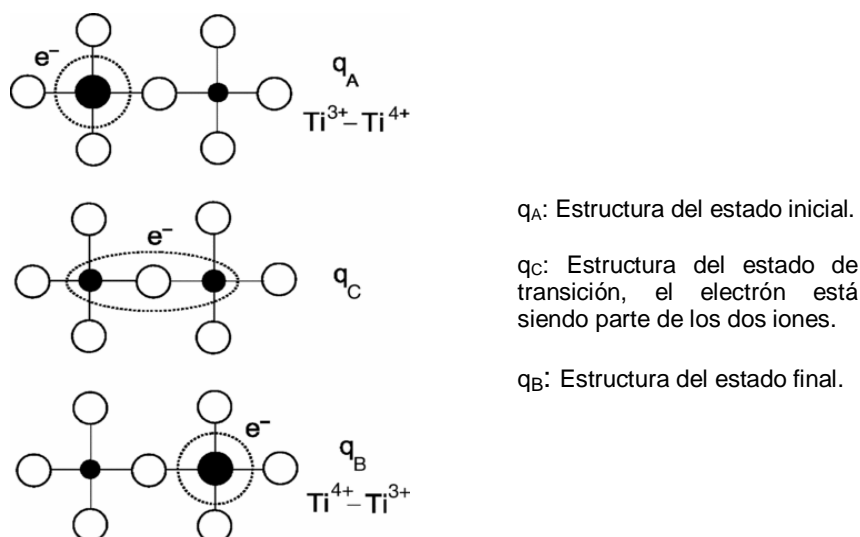


Figura 20. Trasferencia de electrones a través del  $TiO_2$ . Fuente: (62)

Diferentes investigaciones han probado que los electrones son mayoritariamente atrapados por  $Ti^{4+}$  subsuperficiales (51), sin embargo, hay estudios que demuestran que los sitios hidroxilados de la superficie  $\{>Ti^{IV}OH\}$  pueden capturar electrones para formar  $\{>Ti^{III}OH\}$  (63). Estos grupos pueden ser centros de recombinación con mayor velocidad que la recombinación en los sitios más profundos (60)(64), actuando como inhibidor de las reacciones de oxidación. Cabe recordar que las reacciones de fotocatalisis se dan en la superficie, por lo que si el electrón de la superficie no se captura rápidamente por oxígeno disponible, se recombina. Más adelante, en la Tabla 16, se dará mostrará estas reacciones involucradas.

Por otra parte, la captura de los huecos ha sido discutida por diferentes investigadores, que han llegado a resultados contradictorios(65) (66) en algunos puntos sobre la naturaleza de las trampas de huecos y sus posibilidades energéticas; estos puntos serán discutidos a continuación:

✓ El hueco puede ser atrapado por superficie no hidrolizada, específicamente por  $O^{2-}$  superficiales  $\{TiO^{IV}-O^{2-}-Ti^{IV}\}$ , lo que genera el radical  $O_s^{\bullet-}$  (s=superficial). Ésta es una de las investigaciones con mayor coherencia a través de los diferentes estudios realizados (67)(68). Esta especie participa directamente en la transferencia electrónica en la superficie hacia especies absorbidas. Un ejemplo de ésta transferencia se puede observar en la Figura 21, en donde se ilustra según la investigación del autor (69) la transferencia electrónica desde donadores y aceptores de electrones hacia las trampas de portadores de carga 1), un donador captura el radical  $O_s^{\bullet-}$ , dejando una vacante de oxígeno en la superficie 2), recuperada finalmente por la hidrólisis disociativa del agua en 3) (60).

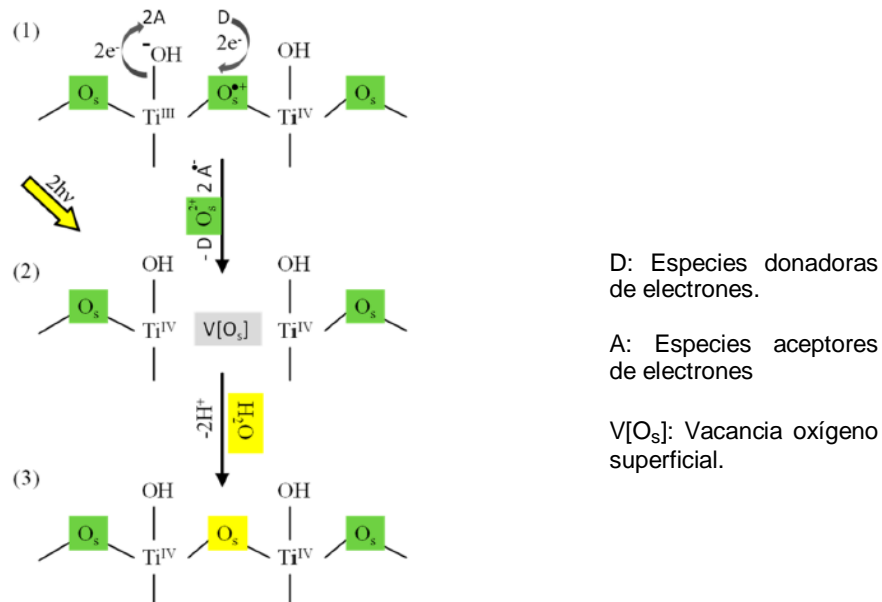


Figura 21. Mecanismo de oxidación fotocatalítica desde la superficie del  $TiO_2$ .  
Fuente: (60)

✓ Los sitios hidroxilados en la superficie del fotocatalizador puede actuar como trampa para los huecos. Algunos estudios negaron ésta posibilidad (65), sin embargo en un estudio realizado por Cheng, VandeVondele y Sprik en el 2014 fue posible demostrarlo, a partir de la simulación AIMD (Ab Initio Molecular Dynamics). Aunque los autores no niega la veracidad de los datos obtenidos por otros investigadores, da una explicación de porque la interpretación de los mismos no es correcta (66). En la Reacción 4 se ilustra como el hueco es atrapado por la superficie hidroxilada del  $TiO_2$ ; y se representa  $\{TiO^{IV}-O^{2-}-Ti^{IV}\}-OH^{\bullet}$  como  $>Ti^{IV}OH$  aclarando en todo caso, que se trata del dióxido de titanio hidroxilado. El autor también demuestra que esta especie se desprotona espontáneamente, formando

el radical  $\text{-TiO}^\bullet$ , que es más estable pero que tiene un potencial redox levemente menor a la forma protonada (1,7 vs 1,8 V).



Estas especies generadas son apenas menos reactivas que el radical hidroxilo libre (1,9V) por lo que puede oxidar compuestos orgánicos con un potencial cercano a 1,6 V. Esto sugiere un importante aporte para entender los procesos de oxidación desde la superficie del fotocatalizador y no solo desde las especies intermediarias en solución (60) (70).

✓ Un punto supremamente importante, es la generación del radical libre hidroxilo; pues bien, “tradicionalmente” se conoce que se forma a partir de la oxidación del agua sobre la superficie, varios estudios han sugerido que esta reacción no es posible en la fotocatálisis heterogénea, debido a que las barreras de potencial para la desorción de  $\text{OH}^\bullet$  son muy altas (71) y aunque se han observado, su estabilidad es muy baja y no interfiere en las reacciones de fotocatálisis (66). Otros estudios previos habían sugerido que la oxidación se ve favorecida por huecos atrapados en superficie o radicales hidroxilos adsorbidos o generados en la superficie del catalizador que por los radicales hidroxilos libres en la solución o por la transferencia directa de huecos fotogenerados (72). Es importante también aclarar que la formación de radicales hidroxilos libres ocurre en la fotocatálisis, pero a través de un mecanismo de reacción en la fase acuosa, el cual será expuesto más adelante. Este descubrimiento rebate una de la explicación de la formación de esta especie tan importante y replantea retos en la investigación de materiales que permitan la desorción libre del hidroxilo, aumentado así la eficiencia de la reacciones de degradación. En la Tabla 16, se realiza una recopilación de las reacciones de fotoinducción antes señaladas.

Tabla 16. Tiempo de reacciones de fotoinducción.

Proceso	Reacción de iniciación	Tiempo
Fotogeneración	$\text{TiO}_2 + h\nu \rightarrow h^+ + e^-$	Fs
Captura de electrón	$\text{Ti}^{\text{IV}}\text{OH} + e^-_{\text{BC}} \rightarrow \text{Ti}^{\text{III}}\text{OH}$ (superficial)	100 ps
	$\text{-Ti}^{\text{IV}}\text{-} + e^-_{\text{BC}} \rightarrow \text{Ti}^{\text{III}}$ (subsuperficial)	10 ns
Captura de huecos	$\text{Ti}^{\text{IV}}\text{OH} + h^+_{\text{BV}} \rightarrow \text{Ti}^{\text{IV}}\text{OH}^{*\cdot}$	10-25 ns
	$(\text{Ti}^{\text{IV}}\text{O-O}^{2-}\text{-Ti}^{\text{IV}}) + h^+_{\text{BV}} \rightarrow (\text{Ti}^{\text{IV}}\text{O-O}^\bullet\text{-Ti}^{\text{IV}})$	-
Recombinación	$h^+_{\text{BV}} + \text{Ti}^{\text{III}}\text{OH} \rightarrow \text{Ti}^{\text{IV}}\text{OH}$	100 ns
	$e^-_{\text{BC}} + \{\text{Ti}^{\text{IV}}\text{OH}^{*\cdot}\} \rightarrow \text{Ti}^{\text{IV}}\text{OH}$	10 ns

Fuente: **(73)(57)**

**6.1.2.4. Transferencia de cargas y mecanismo de reacción.** La adsorción espontánea de las especies de los contaminantes presentes en la fase acuosa, depende del estado de oxidación de la superficie y del potencial redox del adsorbato, y de que éste último tenga la capacidad de donar o aceptar un electrón; los electrones pueden fluir desde o hacia el adsorbato (60) (52). Como es evidente, las reacciones que ocurren en el  $TiO_2$  son reacciones de oxidación y reducción, por lo tanto se puede “dividir” el fotocatalizador en dos zonas: una donde se dan las reacciones de reducción (electrón) y la otra la oxidación (huecos); estas reacciones interfaciales se muestran a continuación en la Tabla 17.

Tabla 17. Reacciones interfaciales en la fotocatalisis con  $TiO_2$ .

Especies fotoinducidas	Reacciones interfaciales	Tipo
$Ti^{IV}OH + e^-_{BC} \rightarrow Ti^{III}OH$	$+O_2(ads) \rightarrow O_2^-(ads) + \begin{cases} H^+ \rightarrow OOH^*_{ac} \\ H_2O_2 \rightarrow OH^*_{ac} + OH^- + O_2 \end{cases}$ $+OOH^*_{ac} \rightarrow OOH^-_{ac} \xrightarrow{H^+} H_2O_{2ac}$ $+H_2O_2 \rightarrow Ti^{IV}OH + OH^*_{ac} + OH^-$	Reacciones de reducción
$Ti^{IV}OH^- + h^+_{BV} \rightarrow Ti^{IV}OH^\bullet \xrightarrow{-H^+} Ti^{IV}O^{\bullet-}$	$+RH \rightarrow R^* \rightarrow \text{degradación}$	Reacciones de oxidación
$(Ti^{IV}O-O_2^{\bullet-}-Ti^{IV}) + h^+_{BV} \rightarrow (Ti^{IV}O-O^\bullet-Ti^{IV})$	$+H^+_{ac} \rightarrow (Ti^{IV}O-OH^{\bullet-}-Ti^{IV})_{sup}$ $+RH \rightarrow R^* \rightarrow \text{degradación}$	Reacciones de oxidación

Fuente: (73)(57)

Como se mencionó anteriormente, la formación del radical hidroxilo libre, también ocurre indirectamente tanto por las reacciones de oxidación como de reducción. Adicionalmente, hay puntos superficiales activos que se generan por radicales hidroxilos en la superficie del fotocatalizador excitado. Los mecanismos de reacción dependen de cada especie y serán vistos más adelante en la investigación.

## 6.2. FOTO FENTON

Aunque el objeto principal de este trabajo está enfocado en la fotocatalisis heterogénea, se realiza una corta explicación del proceso de Foto Fenton, debido principalmente, que algunas de las investigaciones realizadas en GiFES, están enfocadas en su aplicación(74)(75), por lo tanto se decide dar una inducción a esta técnica.

La técnica Foto Fenton, consiste en la degradación de compuestos orgánicos por una serie de reacciones complejas iniciadas por el llamado reactivo Fenton, que es una combinación de  $Fe^{2+}/H_2O_2$ . En la Tabla 18 se muestran las reacciones de oxidación en soluciones acuosas y a un pH ácido, hasta llegar a la descomposición del contaminante orgánico: I) La reacción en cadena inicia por la formación de radicales libres ( $OH^\bullet$  y  $HO_2^\bullet$ ), II) los cuales pueden recombinarse con el  $Fe^{2+}$  o reducir el  $Fe^{3+}$ ; III) los radicales pueden reaccionar entre sí para formar especies neutras como el agua, oxígeno y peróxido de hidrógeno; IV) las reacciones de equilibrio de los diferentes radicales suceden durante la reacción, cuyo equilibrio se ve afectado por el pH y la temperatura de la solución, puesto que a un pH más bajo, la reacción se desplaza hacia la izquierda, beneficiando la conservación de los radicales libres en la solución; V) finalmente, los radicales tienen una serie de reacciones oxidativas como la abstracción del hidrógeno en un compuesto orgánico, formando un radical alifático, que continúa reaccionando en cadena con especies presentes en la solución para finalmente oxidarse completamente; VI) los radicales causan la adición electrofílica a enlaces dobles; y VII) causa reacciones de transferencias de carga; VIII) la reacción para cuando se forman complejos con diferentes ligandos obtenidos en la oxidación que no son oxidados; IX) el  $Fe^{2+}$  se regenera incidiendo fotones los complejos de  $Fe^{3+}$  y ligandos, cuya absorción depende del tipo de ligando(76).

Tabla 18. Reacciones Foto Fenton de oxidación en solución acuosa y pH ácido.

Reacción	Tipo de reacción
$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + HO^- + HO^\bullet$	I) Reacción inicial
$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + H^+ + HO_2^\bullet$	
$Fe^{2+} + HO_2^\bullet \rightarrow Fe^{3+} + OH_2^-$	II) Reacciones con radicales
$Fe^{2+} + HO^\bullet \rightarrow Fe^{3+} + HO^-$	
$Fe^{3+} + HO_2^\bullet \rightarrow Fe^{2+} + O_2 + H^+$	
$Fe^{3+} + O_2^\bullet \rightarrow Fe^{2+} + O_2$	
$H_2O_2 + HO^\bullet \rightarrow H_2O + HO_2^\bullet$	
$2HO^\bullet \rightarrow H_2O_2$	III) Reacciones radical-radical
$2HO_2^\bullet \rightarrow H_2O_2 + O_2$	
$HO_2^\bullet + HO^\bullet \rightarrow H_2O + O_2$	
$H_2O_2 \leftrightarrow HO_2^\bullet + H^+$	IV) Reacciones de equilibrio del radical
$HO_2^\bullet \leftrightarrow O_2^\bullet + H^+$	
$HO^\bullet \leftrightarrow O^{\bullet-} + H^+$	
$HO_2^\bullet + H^+ \leftrightarrow H_2O_2$	
$HO^\bullet + RH \rightarrow R^\bullet + H_2O$	V) Abstracción de H del carbono alifático
$R - CH = CH_2 + HO^\bullet \rightarrow E - C^\bullet H - CH_2OH$	VI) Adición electrofílica al enlace doble
$HO^\bullet + RX \rightarrow RX^{\bullet+} + HO^-$	VII) Reacción de transferencia de electrones
$Fe^{3+} + nL \xrightarrow{H_2O_2, dark} [FeL_n]^{x+} \rightarrow no\ reacciona$	VIII) Fin de reacciones
$[Fe^{3+}L] + hv \rightarrow [Fe^{3+}]^* \rightarrow Fe^{2+} + L^*$	IX) Regeneración del $Fe^{2+}$
$[Fe(H_2O)]^{3+} + hv \rightarrow Fe^{2+} + OH^\bullet$	
$[Fe(OOC - R)]^{2+} + hv \rightarrow Fe^{2+} + CO_2 + R^\bullet$	

Fuente: (76)

### 6.3. METODOLOGÍAS ANALÍTICAS APLICADAS EN LA FOTOCATÁLISIS

Para obtener cada vez mejores métodos en la aplicación de la técnica de fotocatalisis solar para la degradación de compuestos orgánicos tóxicos y/o refractarios, es necesario tener un equilibrio entre dos aspectos fundamentales: el desarrollo de foto-reactores, más eficientes, baratos y con mayor capacidad, manteniendo control sobre las variables externas que alteran la fotodegradación como la temperatura, el flujo, etc; y la precisión en la medición de la eficiencia en la degradación fotocatalítica (77). En la Figura 22, basada en Malato, 2005 se muestra las disciplinas que ayudan a tener mejores metodologías; en este numeral estudiaremos los métodos analíticos relacionados con la precisión en la medición de la eficiencia fotocatalítica.

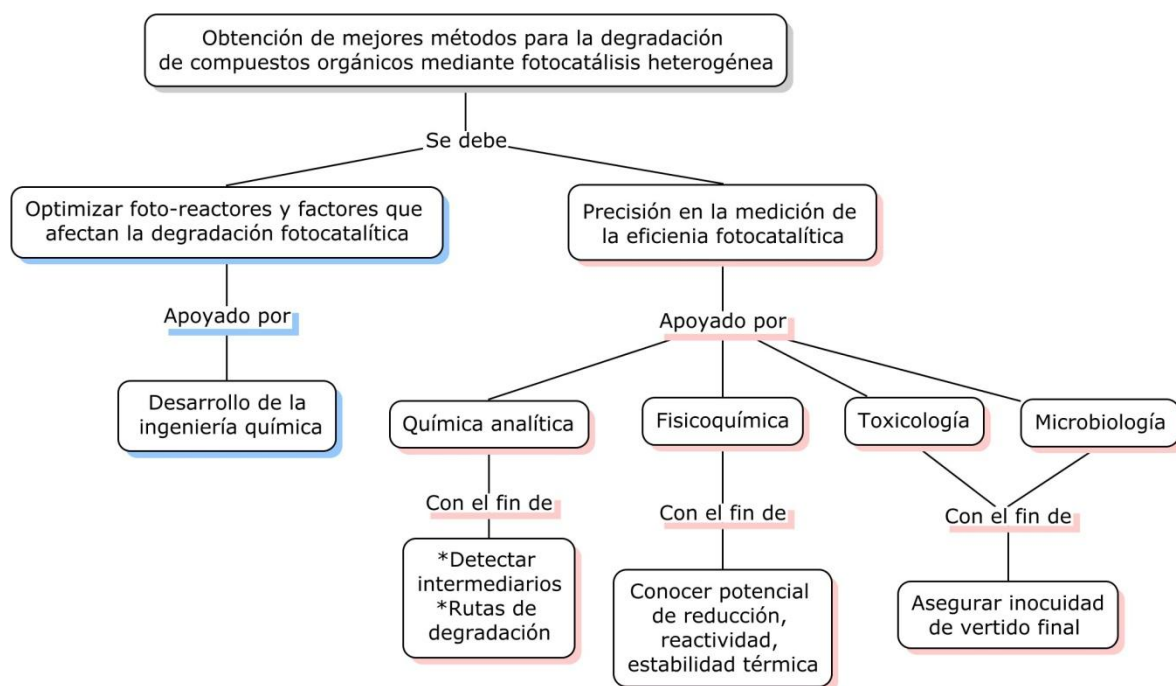


Figura 22. Esquema para la obtención de mejores métodos para la aplicación de la fotocatalisis solar.  
Basado en: (77)

Antes de iniciar a resolver problemas de tipo analítico, es necesario tener en cuenta algunos aspectos importantes para asegurarse de que la metodología y métodos analíticos elegidos sean los más adecuados (ver Ilustración 1).



Ilustración 1. Etapas de un análisis químico.  
Fuente: (78)

Como primera medida es necesario conocer el tipo de muestra que se va evaluar o el tipo de compuesto: propiedades físicas como la solubilidad, color, viscosidad, densidad, concentración, carga orgánica total (COT), los cuales son importantes para reconocer las interferencias que puedan tener en la aplicación del método, por ejemplo, algunos plaguicidas tienen una baja solubilidad en agua, por lo tanto, cuando la muestra se trata en un reactor, la concentración inicial de la muestra en el proceso en estado estacionario, es más baja que la calculada antes de empezar el procedimiento, esto se debe a que parte de los plaguicidas se depositan en las paredes de los tubos o reactores(79). Además conocer las propiedades químicas como su potencial de reducción, reactividad, estabilidad térmica, entre otras, además, de conocer la ecuación química del compuesto al degradarse, con el fin de saber los productos de la degradación (además del  $\text{CO}_2$ ), siendo éstos importantes en el seguimiento de la reacción(77).

El tipo de muestra es de vital importancia, se recomienda evaluar algunas de éstas preguntas: ¿deseo degradar una muestra real o preparada en laboratorio?, si es



una muestra real ¿que otro tipo de compuesto puede estar presente en la muestra real? ¿ es tóxico, difícil de degradar, reactivo?, ¿que tipo de compuesto deseo degradar (fenol, sales, ácidos orgánicos)?. Resolver éstas u otras preguntas que en su labor de químico tenga, minimiza problemas futuros que afecten la investigación. A continuación, en la Tabla 19 se señalan algunos métodos analíticos aplicables en la fotocatalisis solar de compuestos orgánicos y su importancia en desarrollo de la metodología analítica.

Tabla 19. Etapas metodológicas y métodos analíticos

<b>Etapas metodológicas</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Descripción</b>
Investigación previa	Conocer e investigar el tipo de muestra problema y sus condiciones	Propiedades químicas y físicas, condiciones del proceso de producción, tipo de industria, afectación medioambientales y en la salud, estado del arte.
Preparación muestra	Adecuar la muestra para la degradación, evitando interferencias, ineficiencia de la aplicación de la técnica.	Filtración, separación líquido-líquido, extracción en fase sólida, entre otras.
Análisis de parámetros fundamentales	Permiten conocer las condiciones de la muestra problema al iniciar la degradación	COT, Concentración inicial de contaminante, concentración de sales inorgánicas.
Variables de proceso	Tener control sobre las condiciones necesarias para que se lleve a cabo la degradación por Fotocatalisis solar heterogénea	pH, concentración del oxidante, radiación, energía acumulada por unidad de volumen.
Ensayos biotoxicidad	Permite establecer el grado de toxicidad del producto de la degradación y de sus intermediarios, pues el objeto principal de la fotocatalisis solar de compuestos orgánicos es tener un efluente menos tóxico.	Daphnia Magna, Artemia salina, Vibrio Fischeri
Ensayo biodegradabilidad	Conocer si el producto de la degradación es biodegradable y pueda ser sometido a tratamientos biológicos	DQO, DBO, COT
Técnicas analíticas avanzadas	Conocer los tipos de intermediarios obtenidos, realizar seguimiento de la desaparición de una especie, lo que permite realizar el cálculo de la cinética de la degradación.	Fotometría, cromatografía de gases y líquida, espectrometría.

Fuente: (77)(78)

La concentración inicial del contaminante, en caso de que sea una muestra “real”, es decir que no sea preparada en laboratorio puede realizarse mediante cromatografía líquida con detección UV, LC-UV (77), esto como punto de partida para conocer la degradación primaria, es decir la desaparición del compuesto orgánico en la solución. Otro parámetro que es posible evaluar son los iones inorgánicos presentes en la solución, por ejemplo, los compuestos orgánicos clorados, al degradarse forman sales del ion cloro, en la Figura 23 se da un ejemplo, se observa que a medida que avanza la degradación, la concentración de  $\text{Cl}^-$  aumenta, por lo tanto, es un indicativo de la eficiencia de la degradación, siempre y cuando no existan otros compuestos en una mezcla compleja que aporte a ésta concentración (80).

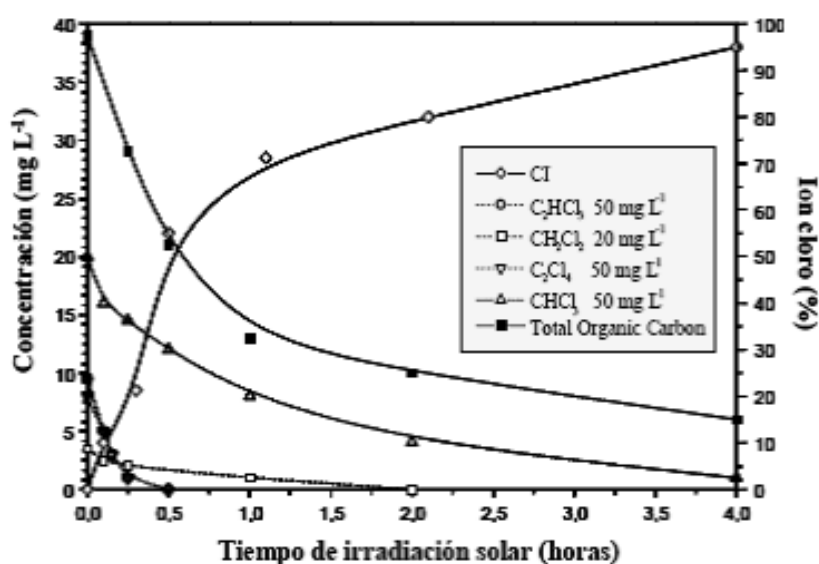
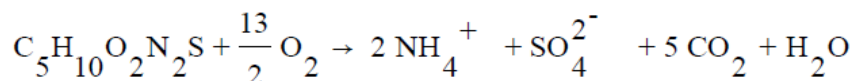


Figura 23. Degradación compuesto orgánico clorados.  
Fuente: (80)

Otro ejemplo es el del Metomilo®, un insecticida de uso común y altamente tóxico, cuyo principio activo es S-metil-N-[(metilcarbamoil)oxi] tioacetamidato, cuya degradación completa genera los siguientes productos:



Ecuación 6

Por cada mol de Metomilo genera 2 moles de iones amonio y una mol de ion sulfato, partiendo de una concentración del producto activo de 50mg/L, la concentración máxima estequiométrica de estos iones son de 11,9 mg/L y 31,8

mg/L respectivamente. En la Figura 24 se observa que el Metomilo no se detecta después de los 75 min, sin embargo, la concentración de los iones también medida, se aproxima a su máximo valor aproximadamente a 200 min, lo que significa que aún persiste intermediarios en la solución, lo que podría significar un aporte a la toxicidad. Adicionalmente, el COT sigue disminuyendo después de los 75 min (80). Estos resultados pueden ser analizados con ensayos de biotoxicidad y biodegradabilidad, para optimizar el tiempo de operación.

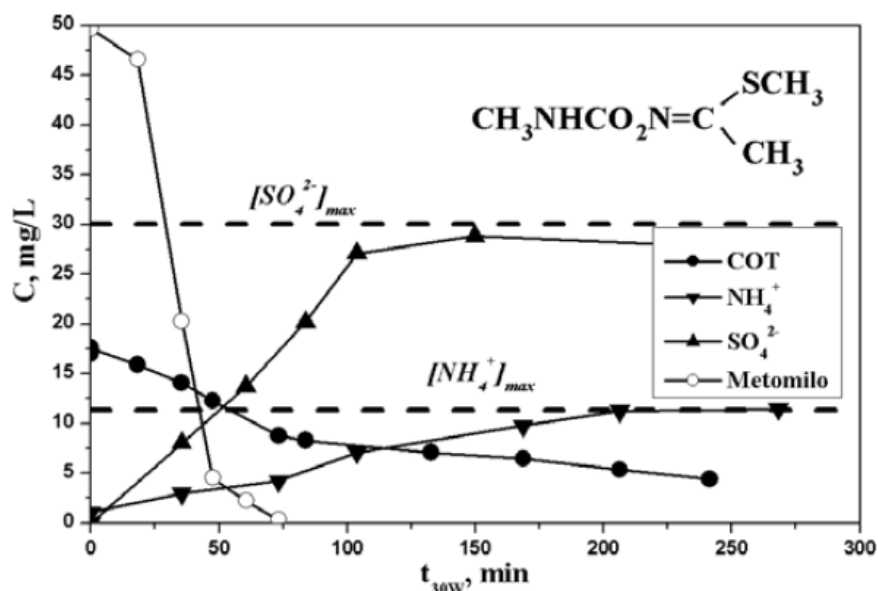


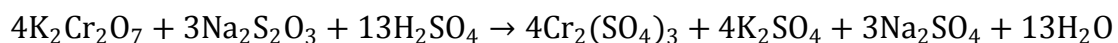
Figura 24. Degradación de Metomilo. Fuente: (80)

**6.3.1. COT y DQO.** La medición del carbono orgánico total COT o TOC por sus siglas en inglés es el método más importante para detectar el contenido orgánico de una muestra de agua, los métodos para medir el COT, consisten en una cámara de combustión a alta temperatura (600-800°C), acoplada con un detector IR, el equipo permite medir el carbono total (CT) y el carbono inorgánico total (CIT), mediante la reacción del ácido fosfórico con carbonatos y bicarbonatos, la diferente entre éstas dos concentraciones es el COT (80)(22) . Con base en resultados obtenidos es posible evaluar el grado de mineralización de compuesto, como se señaló antes, la medición de desaparición del contaminante midiendo su concentración no es suficiente para realizar un análisis de la eficiencia de la degradación. Es útil también para realizar la comparación entre condiciones de proceso, para optimizar y disminuir tiempos de operación.

A menudo, debido a que no se cuenta con recursos suficientes para realizar análisis de COT, se hacen análisis de DQO, sin embargo, la interpretación de los resultados de estas técnicas no es la misma y puede generar interferencia el

hecho de que no es preciso para contaminantes en el orden de unidades de mg/L, muy comunes en la fotocátalisis(77) . El DQO, demanda química de oxígeno, realiza la medición del oxígeno necesario para oxidar las sustancias presentes en la solución susceptibles a la oxidación, cabe anotar que estas sustancias incluyen tanto los compuestos orgánicos como inorgánicos, por lo tanto, ciertos iones inorgánicos como sulfuros, tiosulfatos, sulfitos, nitritos, ion ferroso, ion cromo (III), metales, entre otros, son oxidados por el dicromato de potasio en la prueba del DQO y tenidos en cuenta en el resultado final (80) (81)(31)(77).

El análisis de DQO debe ser entonces interpretado, junto a análisis de DBO<sub>5</sub> como el nivel de biodegradabilidad de la muestra analizada y no como un nivel de degradación del contaminante. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que la presencia de oxidantes usados en la fotocátalisis como el peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), perdisulfato de sodio (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>) cuya presencia es eliminada de la solución adicionando tiosulfato de sodio, reacciona con el dicromato de potasio, interfiriendo de igual manera en el resultado del DQO:



**6.3.2. Análisis toxicidad.** El análisis de toxicidad puede implementarse en diferentes momentos de los ensayos por fotocátalisis, esto con el fin de detectar si el producto de la degradación es apto para realizar un tratamiento biológico(77). Los ensayos de toxicidad están basados en la concentración letal 50 (CL50), la cual es la concentración a la que la sustancia testada causa la muerte del 50% de los organismos. Los tres bioensayos que pueden implementarse son:

- **Movilidad *Daphnia magna*.** *Daphnia magna* es un pequeño crustáceo de agua dulce, alcanza una longitud de 5 a 6 mm, hacen parte de un eslabón intermedio de la cadena alimenticia, hacen parte del zooplancton, es sensible a los contaminantes por el orden de mg/L. Los contaminantes afectan su capacidad de movilidad(77).
- **Luminiscencia bacteria *Vibrio fischeri*.** estos test se basan en la medición de la luminiscencia de una suspensión estandarizadas de la bacteria marina *Vibrio fischeri*. Esta bacteria es gran negativa anaerobia facultativa. El bioensayo basado en esta bacteria se llama comercialmente Biotox®.(77)

- **Artemia salina.** *Artemia* spp. son camarones minúsculos de cuerpo blando, de color carmelita y transparente a la luz; pertenecen al Phylum Arthropoda, clase Crustaceae, subclase Branchiopoda. Llamados como artemia, “monos de mar” o “brine shrimp” en inglés. *Artemia* en estado criptobiótico (quistes) está disponible comercialmente, pues es usado como alimentos para peces y crustáceos en acuicultura (82). El ensayo estándar es conocido como ARC-TEST o ensayo del Centro de Referencia de *Artemia* (82). El procedimiento consiste en exponer compuestos activos y l o extractos de plantas a nauplios de *Artemia salina*, para determinar valores de concentración letal 50 (CL50), expresada en g/ml(83).

**6.3.3. Técnicas analíticas avanzadas.** Realizar el seguimiento de la degradación del compuesto principal y el conocimiento de los intermediarios producidos por la degradación de un compuesto, son las dos razones para aplicar las técnicas analíticas avanzadas. Para realizar una elección de estas técnicas se sugiere tener lo siguiente:

- Cuando se trata del seguimiento de la degradación de un solo contaminante, se conoce previamente su estructura como su concentración, por lo tanto es posible realizar análisis por espectrofotometría, mediante curvas de calibración de la absorbancia vs concentración del patrón y la extrapolación de la absorbancia de la muestra en diferente tiempo de la degradación.
- Si se trata de una mezcla de contaminantes orgánicos desconocidos (muestra real), es necesario realizar una separación y caracterización de los compuestos presentes en la muestra, para lo cual se debe realizar una extracción previa y un análisis cromatográfico acoplado a espectroscopía. El análisis previo sugerido en la Tabla 19 es de gran importancia para facilitar el análisis de los resultados obtenidos. Este punto sugiere más tiempo y la elevación de costos en la investigación, se sugiere que si se conoce el proceso en el que se genera la mezcla de residuos se prepare una mezcla de los contaminantes en las proporciones más cercanas a la realidad y realizar un estudio paralelo entre ambas muestras (real y preparada).
- El análisis de los compuestos intermediarios obtenidos en la degradación de compuestos supone un importante reto para los investigadores, debido a que se trata de mezclas complejas de compuestos orgánicos con diferentes propiedades químicas, especialmente con diferentes polaridades (84). Por lo tanto, para su análisis es necesario realizar primero es la extracción de los compuestos presenten en la mezcla previo a su caracterización. La extracción permite tener una muestra concentrada, y separada de acuerdo a características como la polaridad.

Los métodos de extracción y los métodos analíticos para caracterizar los compuestos son discutidos en la siguiente tabla:

Tabla 20. Métodos analíticos avanzados para la fotocatalisis

Método		Anotaciones
Métodos de extracción	Extracción líquido-líquido (ELL): Extracción con solventes de diferente polaridad.	Poco selectiva, pérdida de compuestos polares, dificultad de romper emulsiones formadas, dificultad en la automatización.
	Extracción en fase sólida (SPE): Extracción con adsorbentes sólidos	Selectiva, menos interferencia de matriz, variedad de adsorbentes.
Métodos analíticos	Métodos espectroscópicos	Espectrometría de resonancia magnética nuclear: determinación de la estructura mediante el análisis de las posiciones relativas de carbonos e hidrógenos.
		Espectrometría infrarroja (IR): método para análisis de grupos funcionales
		Espectrometría de masas: fuente de pesos y fórmulas moleculares
	Cromatografía Líquida	Cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (LC-MS)
		Cromatografía líquida de alta definición con detector ultravioleta (HPLC-UV)
		Cromatografía líquida de alta definición acoplada a espectrometría de masas (HPLC-MS)
	Cromatografía de gases: Técnica para separar compuestos,	Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas de alta resolución (GC-HRMS)

	convertidos a una fase gaseosa con base en sus puntos de ebullición o polaridad.	Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)	temperatura de de operación de la columna pueden usas. Algunos compuestos no volátiles pueden ser derivados a compuestos volátiles.
		Cromatografía de gases con detector de emisión atómica (GC-AED)	b. Los cromatógrafos de gases son más baratos que los líquidos, fáciles de operar y brinda resultados con rapidez.

Fuente: (85)

## 7. INVESTIGACIONES DE GIFES

### 7.1. INFORMACIÓN SOBRE GIFES

Perfil grupo de investigación GIFES de la Universidad Tecnológica de Pereira, de acuerdo a la información encontrada en la base de datos de Colciencias:

Tabla 21. Datos de básicos de GIFES en Colciencias<sup>6</sup>

Datos básicos	
Año y mes de formación	2010 – 1
Departamento – Ciudad	Risaralda – Pereira
Líder	Hoover Albeiro Valencia Sánchez
¿La información de este grupo se ha certificado?	Si el día 2015-01-15
E-mail	<a href="mailto:hvalencia@utp.edu.co">hvalencia@utp.edu.co</a>
Clasificación	C
Área de conocimiento	Ciencias Naturales -- Ciencias Químicas
Programa nacional de ciencia y tecnología	Ciencias Básicas
Programa nacional de ciencia y tecnología (secundario)	Investigaciones en Energía y Minería

Los objetivos planteados por GIFES son:

- Realizar estudios de fotodegradación de compuestos orgánicos tóxicos en medios acuosos por medio de fotocatalizadores usando luz solar.
- Sintetizar nuevos fotocatalizadores por distintos métodos para estado sólido.

---

<sup>6</sup> Información extraída de la página web:  
<http://scienti.colciencias.gov.co:8080/gruplac/jsp/visualiza/visualizagr.jsp?nro=00000000010059>, el día 30 de Agosto de 2016.



- Caracterizar los nuevos materiales por medio de propiedades físicas.
- Refinar por el método de Rietveld las nuevas estructuras cristalinas obtenidas.
- Evaluar los nuevos fotocatalizadores en degradación de sustancias orgánicas y fotólisis de agua.

## 7.2. INVESTIGACIONES REALIZADAS EN GIFES

Cómo se señaló en la metodología del desarrollo de éste proyecto, las investigaciones realizadas en GIFES, han sido sintetizadas en fichas bibliográficas (Ver Anexos A1), en donde se señalan los aspectos más importantes del trabajo, lo que permite al lector, tener de primera mano una síntesis de la misma para que en su momento decida realizar una consulta directamente de la fuente. Las investigaciones incluidas están relacionadas con el objeto de éste proyecto, incluyendo investigaciones de Foto Fenton importantes en la comparación con la fotocatalisis heterogénea.

Al momento de realizar éste trabajo, en GIFES se habían realizado ensayos con diez diferentes sustancias, de las cuales cinco han sido estudiadas tanto en la aplicación de la técnica de fotocatalisis heterogénea como en la homogénea o foto fenton. En la Tabla 22, se resumen las sustancias que han sido objeto de estudio, el origen del residuo y las técnicas aplicadas para su estudio, como se lee, todas las sustancias son generadas en el laboratorio de la escuela de química a excepción del amarillo reactivo y el Novacrón Red LS-BN, lo que sugiera un importante paso para incentivar la aplicación de la técnica en la industria.

Tabla 22. Resumen de las sustancias estudias en GIFES

Sustancia	Técnicas estudiadas		Origen de residuos	
	Fotocatalisis heterogénea	Foto Fenton	Lab. Escuela de Química UTP	Industria
Resorcinol	X	X	X	
Fluoresceína	X	X	X	
1-hidroxi-4-metilbenceno	X	X	X	
3,4-Dinitrosalicílico	X	X	X	
Amarillo reactivo	X	X		X
Azul de metileno	X		X	
Verde de malaquita	X		X	
Mezcla de colorantes		X	X	
Naranja II	X	X	X	
Novacrón Red LS-BN	X			X

En la Tabla 23, se realiza un análisis en cuanto a los avances de la investigación de GIFES, además del trabajo de grado de Hernández y Ramírez, 2015, que si bien no hacen parte de GIFES, fueron asesorados por docentes del grupo de investigación; en la Tabla 23, se relacionan los métodos analíticos, la técnica usada, la fuente lumínica, las variables de proceso consideradas y el tipo de reactor usado en el desarrollo de los experimentos. Estos ítems fueron escogidos porque revelan al lector como los métodos validados en las investigaciones de GIFES han permitido mejorar las técnicas, implementar nuevos análisis y considerar nuevas variables de proceso de acuerdo a los resultados obtenidos.

Tabla 23. Avances de investigaciones de GIFES

Año de publicación		2009		2010		2011	2012	2014		2015			
Autores		(Reinos Osorio 2009)	(Soto Arenas y López Flórez 2009)	(Ramírez Noreña 2010)	(Laina Agudelo 2010)	(Velásquez Salas 2011)	(Carvajal Gómez y Jimenez Coqueco 2012)	(Cruz Betancurt y Torijano Mina 2014)	(Peñaloza y Tobón Carvajal 2014)	(Baicue 2015)	(Hernández y Ramírez 2015)	(Galvis y Osorio 2015)	(Cárdenas 2015)
Métodos analíticos	Espectrofotometría UV/Vis	x	x	x	x	x	x	x	X	X	x	x	x
	Métodos espectroscópicos para caracterización de sólidos (RAMAN, SEM, EDS)										x		
	DQO	x	x	x	x	x	x	x	X	X	x	x	x
	COT				x	x	x	x	x	X			x
	Ensayos <i>Artemia salina</i> (toxicidad)						x	x	x	X		x	
	DBO <sub>5</sub>						x	x	x	X			x
	Dopaje de fotocatalizador por método Pechini									X			x
Técnica	Fotocatálisis heterogénea	x			x	x	x		x	X	x		x
	Fotocatálisis homogénea		x	x				x	x		x	x	
Fuente lumínica	Lámparas UV	x	x	x	x	x	x	x	x	X	x	x	x
	Solar				x	x	x	x		X		x	
Variables consideradas	Radiación solar				x	x	x			X		x	
	Muestra real						x					x	
	Saturación del contaminante en el fotocatalizador						x		x		x	x	x
	Influencia del pH en la absorbancia						x		x	X	x		x
	Tiempo operación necesario						x		x		x	x	x
	Concentración H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	x	x	x	x	x	x	x	x	X	x	x	x

<b>Reactores</b>	Reactor artesanal de bandeja con luz UV/cercano artificial	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x
	Reactor heliofotocatalítico CPC				x	x	x	x					
	Reactor de recirculación con iluminación artificial									X			
	Reactor solar									X		x	

Es necesario que en todos los casos se mida cual es la concentración real de los efluentes de los compuestos químicos, generados en los laboratorios de la escuela de química, para establecer la concentración del o los reactivos de interés y/o su carga de materia orgánica medida en COT, ya que es posible que los resultados varíen, debido a que las muestras no son puras y pueden contener otro tipo de contaminantes que tengan condiciones distintivas y que pueden alterar o no los resultados obtenidos con base en los ensayos realizados para las sustancias por separado; ésta situación se observó en la investigación realizada por Carvajal Gómez y Jiménez Coqueco 2012, cuando la degradación de una muestra real obtuvo menor eficiencia en cuanto a la degradación del contaminante principal, pasando de 96% (para la muestra sintética) a 53,37% en una muestra real, resaltando la interferencia que puede causar el cambio de equipo para la degradación, en donde se usó para la primera muestra un reactor artesanal asistido con lámparas UV y en el segundo caso, se usó un reactor heliofotocatalítico. Por tanto, se sugiere investigaciones en donde se use una misma muestra (real) en todo el momento de la investigación, salvo en casos que se requiera curvas de calibración del contaminante con mayor interés. Elucidar el tipo de intermediarios obtenidos es de gran importancia pues como se observa en todas las investigaciones (ver Anexos), el grado de mineralización no es completamente cero, además.

Aunque es evidente que el grupo de investigación GIFES ha mostrado un crecimiento paulatino, buscando obtener mejor análisis de los resultados obtenidos, se detecta algunos retos en: aplicaciones bajo condiciones de muestra reales, análisis de sus intermediarios, medición de las sales inorgánicas y la evaluación de costos reales de operación.

### 7.3. IDENTIFICACIÓN DE GRUPOS DE INVESTIGACIÓN SOBRE FOTOCATÁLISIS EN UNIVERSIDADES A NIVEL NACIONAL

Para un investigador, es enriquecedor conocer cuáles son los grupos de investigación que están realizando estudios similares a los que lleva a cabo, para realizar posibles alianzas, consulta de sus resultados, metodologías usadas, entre otras. En Colombia, según la base de datos de la página web <http://www.colciencias.gov.co/> consultada por última vez el día 8 de septiembre del 2016, teniendo en cuenta claves de búsqueda como: Fotocatálisis, catálisis, materiales, fotoquímicos, procesos de oxidación, fisicoquímica; se encontraron 26 grupos de investigación que realizan o han realizado investigaciones relacionadas con la fotocatalisis heterogénea u homogénea para la degradación de compuestos o que hayan realizado estudios de fotocatalizadores para ser usados en la aplicación de estas técnicas. En la Tabla 24, se muestra ésta compilación realizada ordenadas alfabéticamente.

Tabla 24. Grupos de investigación sobre fotocatalisis a nivel nacional

CIUDAD	INSTITUCIÓN	GRUPO O SEMILLERO	DIRECCIÓN WEB	CONTACTO
Armenia	Universidad del Quindío	Grupo químico de Investigación y desarrollo ambiental	<a href="http://www.uniquindio.edu.co">www.uniquindio.edu.co</a>	Eunice Ríos Velásquez <a href="mailto:erios@uniquindio.edu.co">erios@uniquindio.edu.co</a>
Barranquilla	Universidad del Atlántico	Grupo de investigación en Oxi/Hidrotratamiento Catalítico y nuevos materiales	<a href="http://www.uniatlantico.edu.co">www.uniatlantico.edu.co</a>	Esneyder Puello Polo <a href="mailto:esneyderpuello@mail.uniatlantico.edu.co">esneyderpuello@mail.uniatlantico.edu.co</a>
Barranquilla	Universidad del Atlántico	Procesos Químicos y Biológicos Sostenibles	<a href="http://www.uniatlantico.edu.co/uatlantico/investigacion/grupo-del-carb-n">http://www.uniatlantico.edu.co/uatlantico/investigacion/grupo-del-carb-n</a>	Luis Guillermo Abregon Quiñones <a href="mailto:luisobregon@mail.uniatlantico.edu.co">luisobregon@mail.uniatlantico.edu.co</a>
Barranquilla	Universidad del Atlántico	Grupo de Investigación fotoquímica y fotobiología	<a href="http://www.uniatlantico.edu.co">www.uniatlantico.edu.co</a>	Carlos Enrique Díaz Uribe <a href="mailto:carlosdiaz@mail.uniatlantico.edu.co">carlosdiaz@mail.uniatlantico.edu.co</a>
Bogotá	Universidad Nacional de Colombia	Grupo de investigación en materiales, catálisis y medio ambiente	<a href="http://www.unal.edu.co">www.unal.edu.co</a>	Hugo Ricardo Zea Ramirez <a href="mailto:gicatma_fibog@unal.edu.co">gicatma_fibog@unal.edu.co</a>
Bogotá	Universidad Nacional de Colombia	Estado sólido y Catálisis Ambiental	<a href="http://www.unal.edu.co">www.unal.edu.co</a>	Rafael Alberto Molina Gallego <a href="mailto:ramolinag@unal.edu.co">ramolinag@unal.edu.co</a>
Bogotá	Fundación Universitaria de América	Materiales fotoactivos	<a href="http://www.uamerica.edu.co/">http://www.uamerica.edu.co/</a>	Cesar Quiñones Segura

Bogotá	Universidad Antonio Nariño	Grupo de Investigación en Biología aplicada , química de materiales ambiental	<a href="http://www.uan.edu.co">www.uan.edu.co</a>	Nancy Isabel Castillo Orjuela <a href="mailto:nancastillo@uan.edu.co">nancastillo@uan.edu.co</a>
Bogotá	Pontificia Universidad Javeriana	Grupo de investigación Fitoquímica Universidad Javeriana	<a href="http://www.javeriana.edu.co/Facultades/Ciencias/gifuij/Fito.htm">http://www.javeriana.edu.co/Facultades/Ciencias/gifuij/Fito.htm</a>	Jorge Eliecer Robles Camargo <a href="mailto:jrobles@javeriana.edu.co">jrobles@javeriana.edu.co</a>
Cali	Universidad del Valle	Laboratorio de Investigación en Catálisis y Procesos	<a href="http://licap.correounivalle.edu.co/">http://licap.correounivalle.edu.co/</a>	Julián Urresta Aragón <a href="mailto:Julian.urresta@correounivalle.edu.co">Julian.urresta@correounivalle.edu.co</a>
Cali	Universidad del Valle	Grupo de Investigación en Procesos Avanzados para Tratamientos Biológicos y Químicos- GAOX	<a href="http://gaox.univalle.edu.co">http://gaox.univalle.edu.co</a>	Irma Janeth Sanabria Gómez <a href="mailto:Janeth.sanabria@correounivalle.edu.co">Janeth.sanabria@correounivalle.edu.co</a>
Cartagena	Universidad de Cartagena	Laboratorio de investigaciones en catálisis y nuevos materiales LICATUC	<a href="http://www.unicartagena.edu.co">www.unicartagena.edu.co</a>	Aida Liliana Barbosa López <a href="mailto:abarbosal@unicartagena.edu.co">abarbosal@unicartagena.edu.co</a>
Cartagena	Universidad de Cartagena	Grupo de Modelado y aplicación de Procesos Avanzados de Oxidación	<a href="http://www.unicartagena.edu.co">www.unicartagena.edu.co</a>	José Angel Márquez Jcolinam@unicartagena.edu.co
Floridablanca	Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga	Grupo de Investigación en nuevos Materiales y Energías Alternativas- GINMEA	<a href="http://www.ustabuca.edu.co">www.ustabuca.edu.co</a>	Hernando Alberto Camargo García <a href="mailto:director@ginmea.org">director@ginmea.org</a>
Manizales	Universidad nacional de Colombia	Grupo de Investigación en Aplicación de Nuevas tecnologías	<a href="http://www.unal.edu.co">www.unal.edu.co</a>	Javier Fontalvo Azate <a href="mailto:jfontalvoa@unal.edu.co">jfontalvoa@unal.edu.co</a>
Manizales	Universidad nacional de Colombia	Grupo de fisicoquímica computacional	<a href="http://www.unal.edu.co">www.unal.edu.co</a>	Javier Fontavo Azate <a href="mailto:jfontalvoa@unal.edu.co">jfontalvoa@unal.edu.co</a>
Manizales	Universidad nacional de Colombia	Grupo de Investigación en Procesos Reactivos Intensificados con separación y Materiales Avanzados (PRISMA)	<a href="http://www.unal.edu.co">www.unal.edu.co</a>	Miguel Angel Fómez García <a href="mailto:magomez@unal.edu.co">magomez@unal.edu.co</a>
Medellín	Universidad Nacional de Colombia	Ciencia de Materiales Avanzados	<a href="http://www.unal.edu.co">www.unal.edu.co</a>	Elizabeth Pabón Gelves <a href="mailto:epabon@unal.edu.co">epabon@unal.edu.co</a>
Medellín	Universidad de Antioquia	Catalizadores y Adsorbentes	<a href="http://www.udea.edu.co">www.udea.edu.co</a>	Adriana Echavarría Isaza <a href="mailto:adriana.echavarria@udea.edu.co">adriana.echavarria@udea.edu.co</a>
Medellín	Universidad Eafit	GIPAB (Grupo de Investigación en Procesos Ambientales)	<a href="http://www.eafit.edu.co/Paginas/index.aspx">http://www.eafit.edu.co/Paginas/index.aspx</a>	Edison Hernán Gil Pavas <a href="mailto:egil@eafit.edu.co">egil@eafit.edu.co</a>
Medellín	Universidad de Antioquia	Procesos Fisicoquímicos aplicados	<a href="http://www.udea.edu.co">www.udea.edu.co</a>	Gloria María Restrepo Vásques <a href="mailto:gloma@udea.edu.co">gloma@udea.edu.co</a>

Medellín	Politécnico Colombiano 'Jaime Isaza Cadavid'	Grupo de Investigación en Química Básica y Aplicada a procesos bioquímicos, biotecnológicos y ambientales	<a href="http://www.politecnicojic.edu.co">www.politecnicojic.edu.co</a>	Alba Nelly Ardila Arias <a href="mailto:anardila@elpoli.edu.co">anardila@elpoli.edu.co</a>
Medellín	Universidad de Antioquia	Grupo de Investigación en remediación ambiental y biocatálisis	<a href="http://www.udea.edu.co">www.udea.edu.co</a>	Ricardo Antonio Torres Palma <a href="mailto:Ricardo.torres@udea.edu.co">Ricardo.torres@udea.edu.co</a>
Piedecuesta	Universidad Industrial de Santander	Centro de investigación en catálisis	<a href="http://cicatus.blogspot.com.co">http://cicatus.blogspot.com.co</a>	Victor Gabriel Baldovino Medrano <a href="mailto:vicbaldo@uis.edu.co">vicbaldo@uis.edu.co</a>
Popayán	Universidad del Cauca	Catálisis	<a href="http://www.catalisis.unicauca.edu.co">www.catalisis.unicauca.edu.co</a>	Alfonso Enrique Ramírez Sanabria <a href="mailto:aramirez@unicauca.edu.co">aramirez@unicauca.edu.co</a>
Tunja	Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia	Grupo de catálisis de la Universidad pedagógica y Tecnológica de Colombia (GC-UPTC)	<a href="http://www.uptc.edu.co/">http://www.uptc.edu.co/</a>	Hugo Alfonso Rojas Sarmiento <a href="mailto:hrojas_sarmiento@hotmail.com">hrojas_sarmiento@hotmail.com</a>

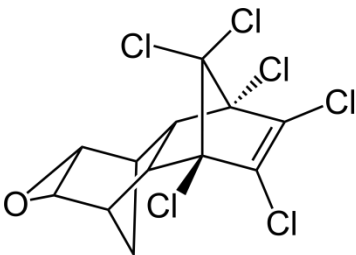
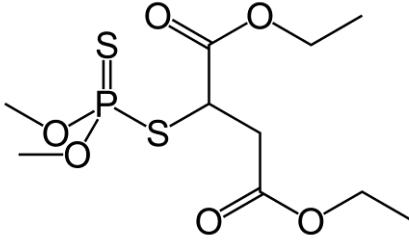
## 8. APLICACIONES INDUSTRIALES DE LA TÉCNICA PARA LA DEGRADACIÓN EN ALGUNOS COMPUESTOS TÓXICOS

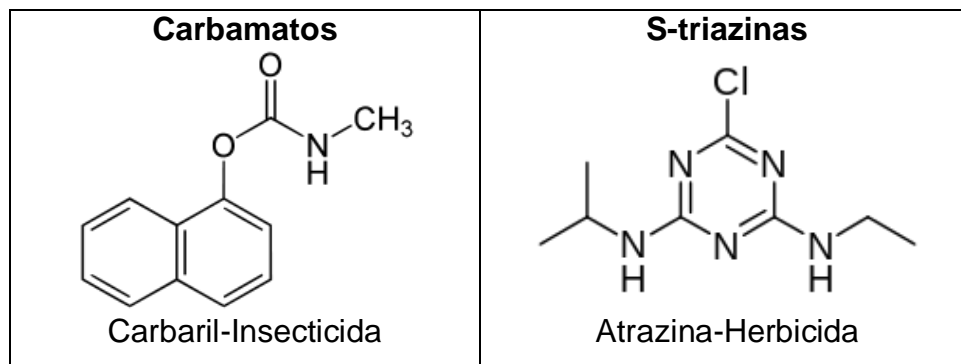
Si bien, se ha señalado a lo largo de éste trabajo que una de las ventajas de la Fotocatálisis heterogénea es poder realizar la degradación de mezclas complejas de contaminantes, hay algunos aspectos o resultados que deben tenerse en cuenta y que representan retos para los investigadores: dificultad en el seguimiento de la degradación, dosificación adecuada de oxidante (en caso de que se use), la falta de homogeneidad de los efluentes de tipo industrial, las altas concentraciones de contaminantes que lleva a diluciones dispendiosas, las posibles reacciones de los intermediarios que pueden aumentar o disminuir el efecto tóxico del efluente, entre otras. En cada uno de los ejemplos de aplicaciones que se expone en éste capítulo, se busca aclarar las dificultades y posibles soluciones que han encontrado los diferentes autores consultados.

### 8.1. DEGRADACIÓN DE PLAGUICIDAS

La agricultura es una de las más altas actividades económicas de nuestro país(86) siendo de gran importancia para la productividad de las siembras el uso de agroquímicos como plaguicidas; por su acción biológica son clasificados en: acaricida, bactericidas, defoliantes, desecantes, funguicidas, herbicidas, insecticidas, moluscocidas, nematicidas, reguladores del crecimiento, repelentes, rodenticidas, viricidas, repelentes, atrayentes, ovicidas (87). Químicamente, los plaguicidas están clasificados en hidrocarburos clorados, pesticidas organofosforados, Carbamatos y s-triazinas. En la Tabla 25 se muestra las estructuras químicas de acuerdo a la clasificación química y su correspondiente acción biológica.

Tabla 25. Clasificación química de plaguicidas

Hidrocarburos Clorados	Pesticidas organofosforados
 <p>Aldrin-Insecticida</p>	 <p>Malation-Insecticida</p>



Fuente: (88)

Se estima que un 68% de la contaminación al medio ambiente por plaguicidas tiene su origen en la actividad agrícola, el 17% a procesos industriales, 8% por uso doméstico y el 7% a diversos usos (89). El uso agrícola y los procesos industriales representan en total 85% de la contaminación por plaguicidas, las practicas de aplicación, el transporte y el posconsumo representan uno de los factores más importantes a controlar para minimizar este impacto.

La legislación colombiana en la Resolución 693 de 2007 “*Por la cual se establecen criterios y requisitos que deben ser considerados para los Planes de Gestión de Devolución de Productos Posconsumo de Plaguicidas*”, exige, entre otras disposición de manipulación y cuidados; que estos envases deben ser llevados a centros de acopio por entidades avaladas para ser tratados adecuadamente. El tratamiento de las aguas de lavado de éstos envases plásticos, como otros casos en donde se requiera tratar efluentes con éste tipo de contaminación, representa una oportunidad de aplicación de la Fotocatálisis heterogénea y homogénea, la cual ha sido estudiada ampliamente(79)(80) , por ejemplo: la Plataforma solar de Almería en la Tesis doctoral llamada “*Descontaminación de aguas de lavado de envases de plaguicidas mediante fotocatalisis solar*” por Maldonado, 2000 (84), en donde se evidencia una aplicación real, con una matriz compleja de plaguicidas, llegando a resultados positivos.

Además de ésta aplicación, se destaca la Tesis doctoral realizada en la Universidad Murcia en España por Escudero García, 2015 (89) llamada: “*Regeneración de aguas contaminadas por plaguicidas (sustancias prioritarias y preferentes), con elevado potencial de lixiviación, mediante fotocatalisis solar heterogénea*”. Teniendo en cuenta que en Europa se usa de un 60 a un 65% las aguas subterráneas para potabilizar, su preocupación se encuentra enfocada a evitar que estas aguas lleguen a los pozos subterráneos.

Escudero García, 2015 diseña un trabajo experimental en donde se usa plaguicidas incluidos como sustancias prioritarias y/o preferentes de acuerdo a su



legislación; se realizó la degradación fotocatalítica de los compuestos que no fueron retenidos en la capa de suelo con enmendantes orgánicos (estiércol compostado, residuos de café, fibra de coco y corteza de pino), que tienen por lo tanto el mayor potencial de lixiviación, además del agua una vez se sometió a biodegradación adicionando un inoculante microbiológico llamado BIOPUR®, es decir, el proceso de Fotocatálisis lo aplican después de realizar un tratamiento biológico. Los resultados obtenidos evidencia la efectividad del tratamiento, llegando a una serie de condiciones que mejoran la eficiencia del mismo, las cuales más adelante se sintetizarán junto con otras investigaciones relacionadas con la degradación de plaguicidas. En la Figura 25 se muestra el diseño experimental a detalle.

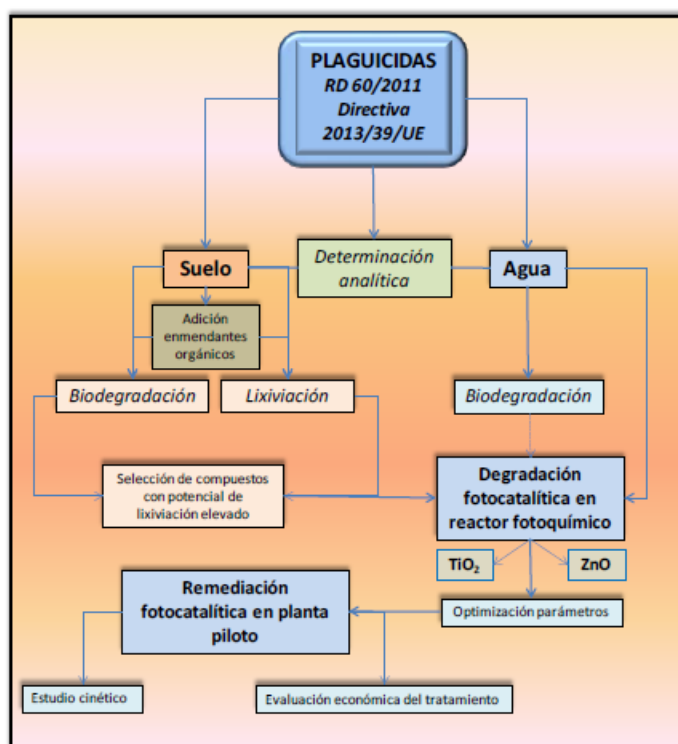


Figura 25. Diseño experimental regeneración de plaguicidas con elevado potencial de lixiviado. Fuente: (89)

Teniendo en cuenta información investigada sobre la degradación de plaguicidas, se realiza un compendio de los aspectos más destacables encontrados en estos algunos documentos estudiados. En la Tabla 26, se muestra el concepto abordado y lo observado basado en este ítem, además de la referencia donde se puede consultar el detalle.

Tabla 26. Compilación de dificultades y condiciones adecuadas para degradación de plaguicidas por Fotocatálisis Solar heterogénea

Concepto	Observación	Referencia
COT máximo de plaguicidas inicial	Se sugiere un máximo de 100 mg/L debido a que se observa formación de espuma, lo que puede afectar la operación.	(Maldonado 2000) (79)
Tipo de oxidante	En diferentes experimentos se tiene como resultado que usar como oxidante el $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ en vez de $\text{H}_2\text{O}_2$ incrementa la velocidad de reacción, además su consumo es menor, se sugiere realizar ensayos con $\text{H}_2\text{O}_2$ para comprobarlo.	(Maldonado 2000) (79) (Escudero García 2015) (89) (Garrido Martín 2016)(90) (Rodríguez et al. 2004) (91)
Fotocatalizador	$\text{TiO}_2$ o $\text{ZnO}$ siendo este último el que mayor eficiencia representa, sin embargo, puede aumentar su toxicidad por la oxidación con los huecos fotogenerados, formando $\text{Zn}^{+2}$ en solución, el cual se debe hacer precipitar a pH de 9.	(Escudero García 2015) (89) (Garrido Martín 2016)(90)
Adherencia de los plaguicidas	Se adhieren a las paredes debido a que algunos son hidrofóbicos, realizar recirculación con iluminación durante unos minutos antes de tomar muestras para COT	(Maldonado 2000) (79) (Rodríguez et al. 2004) (91)
Medición concentración de sales inorgánicas	No es conveniente medir Sulfatos cuando se usa como oxidante el $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ pues éste puede generar éstos iones y aumentar la concentración en solución.	(Rodríguez et al. 2004) (91)

## 8.2. DEGRADACIÓN DE COLORANTES DE LA INDUSTRIA TEXTIL

En el 2013, se genera un informe por la Superintendencia de Sociedades, que señala a Risaralda como el quinto departamento con mayor participación en el sector textil con un 3,14%, con 26 empresas, siendo Bogotá el epicentro del sector con un 48,31% de participación (92). La industria textil genera una serie de residuos que pueden afectar el medio ambiente, en la Tabla 27 se muestra el impacto que tiene sobre los diferentes componentes ambientales, nuestro interés está en la contaminación hídrica, donde se observa gran impacto en la etapa de hilandería y tejeduría, cuando se hace el teñido del hilado, debido principalmente a los residuos colorantes usados; de igual manera, en la etapa de acabado de telas y prendas, al momento de realizar el tinturado, se generan residuos contaminados con colorantes (93).

Tabla 27. Matriz de valoración impactos ambientales proceso textil<sup>7</sup>

Impactos potenciales				Etapas del proceso textil								
				HILANDERÍA Y TEJEDURÍA					ACABADO DE TELAS Y PRENDAS			
				Cardado	Hilado	Teñido de hilado	Tejido	Confección	Desengomado	Tinturado	Estampado	Suavizado
Componente ambiental	ABIÓTICO	Hídrico	Consumo de agua.	NA	NA	▲	NA	NA	▲	▲	▲	■
			Generación de vertimientos con alta carga contaminante (DBO, DQO, SAAM*, fenoles, entre otros).	NA	NA	▲	NA	NA	▲	▲	▲	■
			Generación de vertimientos con elevada temperatura.	NA	NA	▲	NA	NA	▲	▲	▲	■
		Atmosférico	Emisiones de material particulado.	■	■	NA	●	●	NA	NA	NA	NA
			Emisiones de gases, vapores o neblinas.	NA	NA	●	NA	NA	●	■	▲	●
			Generación de ruido.	■	▲	●	▲	■	■	■	■	■
	Suelo	Generación de residuos sólidos.	●	●	■	●	●	■	■	■	■	
		Social	Generación de empleo.	△					△			
			Afectación de la salud de empleados y de la comunidad circundante.	■	▲	■	●	●	■	■	■	■

NIVEL DE IMPACTO	CONVENCIÓN
Alto positivo	△
Alto negativo	▲
Medio positivo	□
Medio negativo	■
Bajo positivo	○
Bajo negativo	●
No aplica	NA

Fuente: (93)

Químicamente, el colorante es una estructura que se compone de dos partes: una que genera el color llamada *cromágeno* (receptor de electrones) y otra llamada *auxocromo* (donador de electrones que es la encargada de realizar la coloración y dar solubilidad). El cromágeno es aromático y contiene un grupo que causan el color, llamado cromóforos, los más comunes son: el grupo nitroso (-NO o =N-OH); el grupo nitro (-NO<sub>2</sub> o = NOOH); el grupo azoico (-N=N-); el grupo etilénico (>C=C<); el grupo carbonilo (>C=O); los grupos carbono- nitrógeno (>C=NH y -CH=N) y los grupos carbono- azufre (>C=S) (94). Los colorantes, pueden entonces clasificarse en 12 grupos: colorantes ácidos, colorantes azoicos, colorantes básicos, colorantes directos, colorantes dispersos, colorantes reactivos con fibras, agentes abrillantadores fluorescentes, colores para alimentos, drogas y cosméticos, colorantes mordentes, colorantes disolventes, colorantes con azufre y colorantes de tina (94).

<sup>7</sup> SAAM: Sustancias Activas al Azul de Metileno. Parámetro para determinar cantidad de tensoactivos en una muestra de agua.

Las aguas residuales de estas industrias son tratadas por procesos físico-químicos y biológicos, como lo son los fangos activados, sin embargo, los colorantes representan un desafío debido a que son difíciles de oxidar por métodos anaeróbicos, procesos oxidativos pueden llevar a desaparecer el color por la oxidación de los grupo cromóforos, pero no logran la mineralización (31).

La reutilización de las aguas, una vez se realice la fotocátalisis heterogénea solar, ha mostrando resultados casi iguales en el proceso de tinción, comparado con el agua de proceso que normalmente se usa. Una investigación realizada por Pey Clemente 2008, donde se reutilizó el agua tratada por fotocátalisis heterogénea solar con  $\text{TiO}_2$ , del color Reactive Red 110 se demostró que es posible realizar éste procedimiento sin alterar la calidad del color. En las Figura 26 se muestra la curva  $K/S^8$  vs longitud de onda, esta curva es característica de cada color. En la figura se evidencia una diferencia entre la curva de la tinción 1 y 2, sin embargo, el resultado de la diferencia de color  $\Delta E$  (1,3859) es aceptable o pasa de acuerdo al estándar de la empresa. Vale aclarar que el valor máximo de  $\Delta E$  aceptable es definido por cada empresa de acuerdo a las características de calidad esperada o a lo solicitado por el cliente.

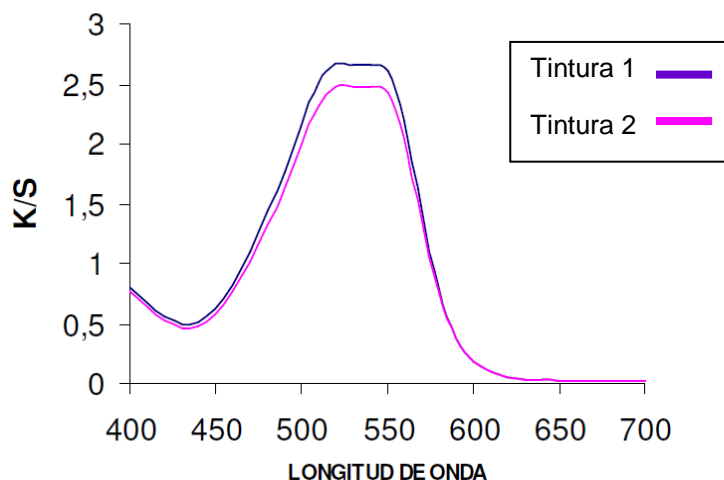


Figura 26. Curva de relación  $K/S$  Vs longitud de onda para tinción con Reactivo Red 110  
Fuente: (95)

<sup>8</sup> Fuerza de color, donde K: coeficiente de absorción y S: coeficiente de dispersión (refractancia)

La Figura 27 es una muestra de tela teñida con agua de proceso limpia (tintura 1) y con agua tratada por fotocátalisis (tintura 2).

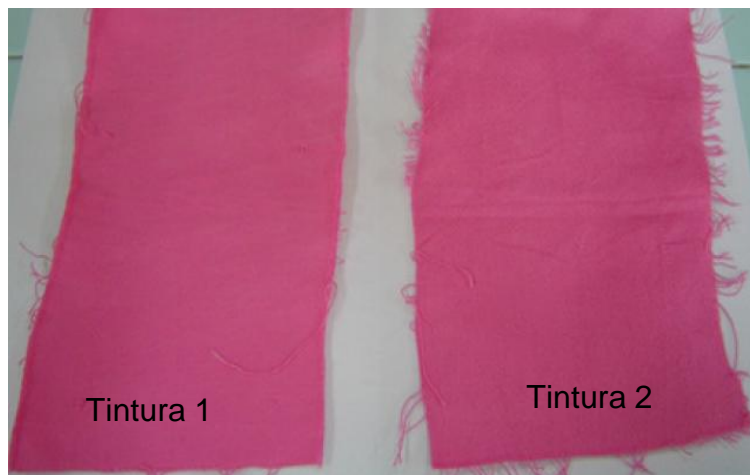


Figura 27. Tintura con aguas tratada por fotocátalisis heterogénea solar.  
Fuente: (95)

De acuerdo a los resultado anteriores, en la Figura 28 se muestra una alternativa al proceso de tratamiento de las aguas contaminadas por colorantes con fangos activos, teniendo en cuenta el resultado obtenido en la investigación de Pey Clemente 2008.

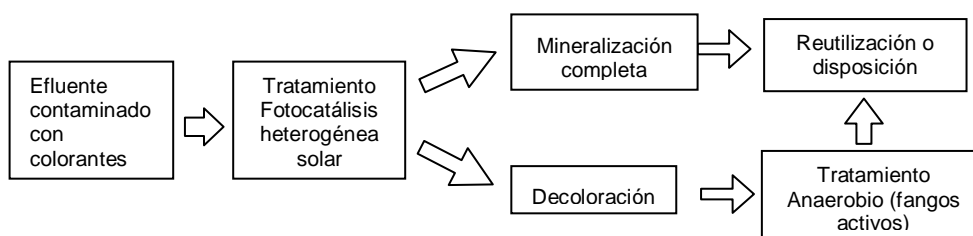


Figura 28. Proceso para tratamiento de aguas contaminadas con colorantes textiles

### 8.3. DESINFECCIÓN MEDIANTE FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA

El agua puede ser contaminada por alta carga de materia orgánica que puede ser vectores de enfermedades infecciosas como lo son las heces de animales(96). La desinfección del agua antes de ser dispuestas en los cuerpos de agua o para la potabilización del agua potable es de vital importancia para evitar estas enfermedades. La diarrea, uno de los síntomas más comunes causadas por el

consumo de agua contaminada con organismos patógenos se cobra cada año la vida de 1,8 millones de niños menores de cinco años o cerca de 4.900 víctimas jóvenes por día en el mundo, siendo los países en desarrollo los más afectados (8).

La mayoría de desinfectantes usados en agua, inactivan los microorganismos por una reacción química que llevan a la muerte de los mismos, los métodos alternativos que usan radiación UV se deben a la absorción de fotones, que generan reacciones fotoquímicas de los componentes fundamentales de las células. Las proteínas absorben el fotón causando la ruptura de las membranas celulares, por lo tanto causando la muerte de la célula; la absorción de fotones por los ácidos nucleicos (RNA y DNA) interrumpe la capacidad de los microorganismos para reproducirse (96).

La fotocátalisis heterogénea con  $\text{TiO}_2$  ha representado un avance importante dentro de las opciones alternativas a la desinfección por uso de químicos como el Cloro. Se destaca una de la investigación realizada en Colombia en el 2012 por Hernández Molano en la Pontificia Universidad Javeriana, donde se realizó la tesis de maestría *“EVALUACIÓN DE FOTOCÁTALISIS HETEROGÉNEA CON  $\text{TiO}_2$  Y PROCESO FENTON PARA EL CONTROL DE *Salmonella* spp EN AGUAS GENERADAS EN PLANTAS DE BENEFICIO AVÍCOLA”*. La investigación realizó pruebas para determinar el grado de inactivación de la *Salmonella*, la fotocátalisis se llevó a cabo en cajas petri con agitación, usando lámparas de radiación UV (254nm). Se tuvieron en cuenta 6 variables que pueden afectar los resultados: Tiempo, concentración celular, pH, agitación, tipo de película de  $\text{TiO}_2$ , longitud de onda. Se usó  $\text{TiO}_2$  dopado con CuO, por tener un mejor desempeño, en el experimento no se usa ningún tipo de oxidante. Los resultados fueron satisfactorios, se logró el 100% de inactivación de dos variedades de *Salmonella*: *S. Enteritidis* y *S. Typhimurium*, la primera tuvo una inactivación a los 25 minutos de exposición y a la segunda, 35 minutos.

En el mismo trabajo, se realizó la comparación con el proceso de desinfección tradicional con hipoclorito de sodio (20ppm) y ácido paracético (80 y 160ppm), obteniéndose una curva de inactivación nula para el hipoclorito de sodio y de 12% para el ácido paracético. Además, se comparó la desinfección usando solo radiación UV, y el sistema fotocatalítico sin iluminación. En la Figura 29, se muestran los resultados obtenidos con relación al tiempo del recuento de colonias de los dos tipos de *Salmonella* estudiados, que se encuentran en las aguas de beneficio del sector avícola.

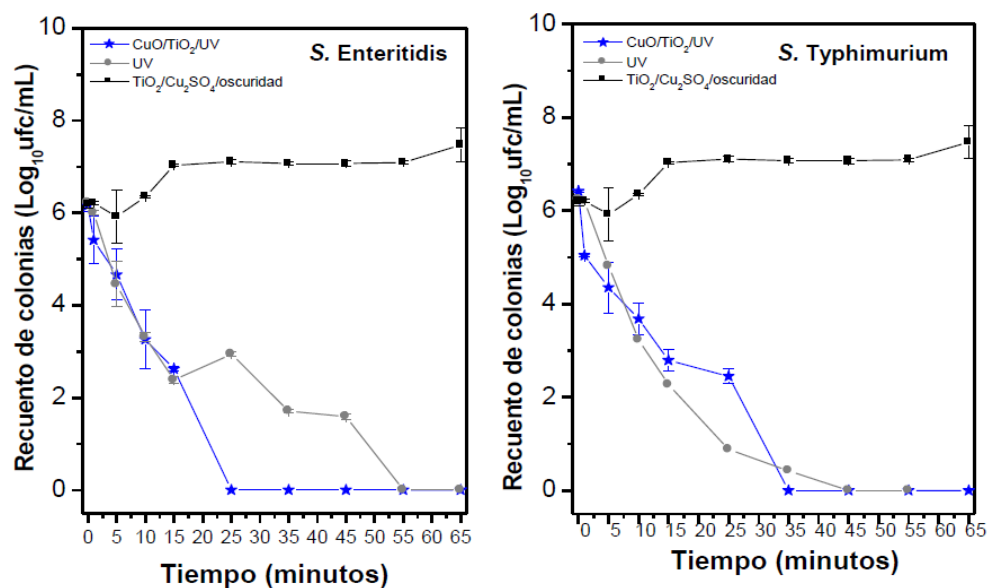


Figura 29. Resultado desinfección *Salmonella* por Fotocatálisis heterogénea  
Fuente: (97)

Como se ve en la Figura 29 el proceso se ve favorecido cuando se realiza la fotocatalisis heterogénea empleando películas modificadas de TiO<sub>2</sub> con CuO, y bajo radiación UV, ya que ambos microorganismos se inactivan completamente. Sin embargo, con la especie *S. Enteritidis*, se evidencia una diferencia entre el tiempo de inactivación usando el fotocatalizador modificado y con solo radiación UV; solo basta 25 minutos para lograr 0 recuentos en el primer caso, mientras que con solo radiación UV, se inactiva hasta los 55 min. En el caso de *S. Typhimurium*, el tiempo de inactivación entre ambos métodos es casi igual, el TiO<sub>2</sub> modificado con CuO inactiva el microorganismo a los 35 minutos, mientras que la solo radiación UV lo hace a los 45 minutos.

## 9. CONCLUSIONES

De acuerdo al proceso de investigación documental se puede concluir que:

- La oxidación del agua por el movimiento de  $e^-$  fotogenerado en el catalizador para generar un radical hidroxilo ( $OH^*$ ) disponible en la interfaz de la solución, no es posible en la fotocatalisis, debido a las barreras de potencial que impiden su desorción.
- Se pone en evidencia la importancia de los mecanismos superficiales en la oxidación de los compuestos orgánicos.
- Las doce investigaciones relacionadas con la fotocatalisis realizadas por el Grupo de Investigación de Fotocatalisis y Estado Sólido GIFES, demuestra un fortalecimiento de la metodología analítica de manera sistemática, teniendo en cuenta en cada investigación los alcances tenidos por otros investigadores del grupo.
- La aplicación de la fotocatalisis heterogénea en la industria, puede lograr de manera significativa el aumento de los porcentajes de degradación y remoción de contaminantes persistente u organismos patógenos, lo que conlleva a concluir que esta técnica puede ser más eficiente que otros métodos tradicionales, esto se sugiere a la luz del cuerpo documental que hace parte de esta investigación.
- El presente trabajo tiene los elementos necesarios para el cumplimiento del objetivo, puesto que aborda los fundamentos de la técnica de manera actualizada y confiable gracias a la metodología aplicada en la investigación; además, se realiza un análisis contextual de las investigaciones realizadas por GIFES, de manera que pueden ser útiles para futuras investigaciones.
- Se evidencia que ante la falta de disposición de equipos para la aplicación de algunas técnicas avanzadas espectroscópicas y cromatográficas, las investigaciones de GIFES se ven limitadas en cuanto a la interpretación de resultados, tal es el caso de la elucidación de los compuestos persistentes a la degradación que pueden aumentar la toxicidad de las muestras.



- El análisis de DQO para interpretar la degradación de los contaminantes no es recomendable, pues como se mencionó en el presente documento, la presencia de compuestos inorgánicos como el tiosulfato de sodio, usado, altera considerablemente el valor de la DQO por ser una especie oxidable.

## 10. RECOMENDACIONES

- Realizar una investigación documental sobre estado sólido y desarrollo de nuevos materiales para la fotocatalisis, lo que permitirá fortalecer las otras líneas de investigación de GIFES.
- Realizar aplicaciones de la técnica de Fotocatalisis heterogénea a cuerpos de aguas con condiciones reales, pues debido a su complejidad, los resultados pueden diferir con los obtenidos en muestras preparadas en laboratorio.
- Es importante realizar el cálculo numérico del costo del proceso en las diferentes investigaciones, con el fin de evidenciar el aumento o disminución del mismo.
- Evaluar la disminución de tiempos de operación, realizando una oxidación biológica después del tratamiento de los contaminantes por fotocatalisis heterogénea antes de su mineralización completa, teniendo en cuenta las sugerencias señaladas en el presente trabajo.
- Realizar seguimiento de la degradación mediante la aparición de iones orgánicos presentes en las moléculas a degradar, tomando como ejemplo el método ilustrado en esta investigación.
- Realizar análisis de biotoxicidad en diferentes momentos de la degradación de los contaminantes, con el fin de estudiar el nivel de toxicidad de los intermediarios generados.
- Realizar el análisis de las reacciones de degradación de los compuestos a estudiar, con el fin de establecer metodologías adecuadas para el seguimiento de la degradación y poder argumentar adecuadamente los porcentajes de degradación secundaria que se alcanzan.

- Estudiar el uso de oxidantes diferentes al  $\text{H}_2\text{O}_2$ , como el  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ , entre otros, que puedan evitar inconveniente e interferencias por el uso del  $\text{H}_2\text{O}_2$ , realizando análisis comparativos entre los diferentes oxidantes.
- Hacer un monitoreo por medio de barrido espectral en diferentes momentos de la degradación y al final para ver la modificación de las estructuras empleando espectroscopia UV - Vis e IR.

.

## 11.ANEXOS

### A1. Fichas bibliográficas de GIFES.

Tabla 28. Ficha bibliográfica: Reinosa Osorio, 2009

DATOS DEL TRABAJO	
Título de la publicación	Degradación del Resorcinol por fotocátalisis heterogénea mediada por $\text{TiO}_2$ Y $\text{H}_2\text{O}_2$
Fecha de publicación	2009
Autor/es	Paola Andrea Reinosa Osorio
Palabras clave	Resorcinol, Fotocátalisis heterogénea, $\text{TiO}_2$ , $\text{H}_2\text{O}_2$ , Espectrofotometría UV/Vis, DQO.
Lugar de creación	Pereira, Risaralda
ANÁLISIS TRABAJO	
Descripción publicación	Se realizan ensayos en un reactor artesanal de bandeja asistido por lámparas UV cercano, aplicando la técnica de fotocátalisis heterogénea; se realizó el seguimiento de la degradación del Resorcinol mediante la medición de su mineralización (oxidación completa a $\text{CO}_2$ ) y degradación primaria (agotamiento del contaminante), por técnicas analíticas de DQO y Espectrofotometría UV /Vis respectivamente.
Objetivo	Realizar la Degradación de Resorcinol por Fotocátalisis Heterogénea Mediada por $\text{TiO}_2$ y $\text{H}_2\text{O}_2$ en condiciones óptimas.
Anotaciones de metodología utilizada	<u>Equipo:</u> reactor artesanal de bandeja con luz UV/ cercano artificial <u>Metodología:</u> Se realiza cruce de variables de proceso, pH, concentración de $\text{H}_2\text{O}_2$ , concentración del fotocatalizador $\text{TiO}_2$ ; su mineralización (oxidación completa a $\text{CO}_2$ ) y degradación primaria (agotamiento del contaminante) <u>Método de análisis:</u> Espectrofotometría UV (degradación), y DQO (mineralización) Interpretación de datos: ANOVA
Resultados destacables	Condiciones óptimas: 0,7 g/L $\text{TiO}_2$ ; 500ppm $\text{H}_2\text{O}_2$ ; pH 5. %Degradación: 87,6% Grado de mineralización: 66,7%
Análisis del alcance de la investigación	Este trabajo de grado da un enfoque en la aplicación de la técnica para uno de los residuos de las prácticas de laboratorio de química, dando un precedente de la responsabilidad sobre el manejo de estos. Propone y muestra resultados favorables para la degradación del Resorcinol mediante la técnica de Fotocátalisis heterogénea como opción para la solución de este problema.
Conceptos abordados	Espectrofotometría UV/Vis, aplicación de la Fotocátalisis heterogénea, análisis de datos ANOVA.
Publicaciones similares	RAMÍREZ NORENA, A., 2010. <i>Degradación de resorcinol por foto-fenton (UV/Fe+ 2/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)</i> [en línea]. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. [Consulta: 28 marzo 2016]. Disponible en: <a href="http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/dspace/handle/11059/1789">http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/dspace/handle/11059/1789</a> .

Fuente: (98)

Tabla 29. Ficha bibliográfica: Soto Arenas y López Flórez, 2009

DATOS DEL TRABAJO	
Título de la publicación	Degradación fotocatalítica de la Fluoresceína
Fecha de publicación	2009
Autor/es	Cesar Augusto Soto Arenas Gustavo Adolfo López Flórez
Palabras clave	Fluoresceína, Foto fenton, reactivo fenton, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , Espectrofotometría UV, Demanda química de oxígeno, porcentaje de degradación, porcentaje de mineralización.
Lugar de creación	Pereira, Risaralda
ANÁLISIS TRABAJO	
Descripción publicación	Se realizó la aplicación de la técnica de Foto fenton para la degradación de Fluoresceína sódica, a través de la combinación de variables de proceso como lo son la concentración de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , del reactivo fenton. Se eligió la combinación de estas variables que tuvo mejor resultado en cuanto al porcentaje de degradación y de mineralización.
Objetivo	Encontrar las condiciones óptimas para lograr la mayor degradación posible del colorante fluoresceína, utilizando el método de foto fenton.
Anotaciones de metodología utilizada	<u>Técnica:</u> Foto fenton <u>Equipo:</u> Reactor fotocatalítico con tres lámparas negras. <u>Metodología:</u> Se realiza 9 ensayos por triplicado, variando la concentración de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y la concentración de reactivo fenton a un pH de 3. <u>Método de análisis:</u> Espectrofotometría UV (degradación), y DQO (mineralización) Interpretación de datos: ANOVA
Resultados destacables	Condiciones óptimas: 1 g/L H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; 0,2 mg/L reactivo fenton pH 5. Tiempo: 3 h Degradación: 84,47% Grado de mineralización: 42,5%
Análisis del alcance de la investigación	Se evidencia la degradación del compuesto bajo condiciones adecuadas de los reactivos.
Conceptos abordados	Foto fenton, técnicas analíticas de Espectrofotometría UV/ Vis, DQO
Publicaciones similares	LAINA AGUDELO, J.M., 2010. <i>Degradación de la fluoresceína sódica por Fotocatálisis Heterogénea en un reactor heliofotocatalítico</i> . Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

Fuente: (99)

Tabla 30. Ficha bibliográfica: Ramírez Noreña, 2010

DATOS DEL TRABAJO	
Título de la publicación	Estudiar la degradación del Resorcinol por el método de foto catálisis homogénea foto-Fenton ( $UV / Fe^{+2} / H_2O_2$ ).
Fecha de publicación	2010
Autor/es	Alejandro Ramirez Noreña
Palabras clave	Resorcinol, fotocátalisis homogénea, foto-Fenton, catalizador, degradación, mineralización
Lugar de creación	Pereira, Risaralda
ANÁLISIS TRABAJO	
Descripción publicación	Se aplica la técnica de degradación por foto fenton del Resorcinol realizando la variación de las concentraciones de $H_2O_2$ , reactivo fenton, y pH de la solución; con el objeto de obtener las condiciones óptimas que den los mejores de resultados de porcentaje de degradación y mineralización.
Objetivo	Estudiar la degradación del resorcinol por el método de foto-Fenton ( $UV / Fe^{+2} / H_2O_2$ ).
Anotaciones de metodología utilizada	<u>Técnica:</u> Foto fenton Equipo: reactor de diseño artesanal con lámparas de luz ultravioleta de longitud de onda 360 nm. <u>Metodología:</u> variaciones en la concentración de $H_2O_2$ y concentración de reactivo fenton a un pH entre 2,8 y 3. <u>Método de análisis:</u> Espectrofotometría UV-vis (degradación), y DQO (mineralización) <u>Interpretación de datos:</u> ANOVA
Resultados destacables	Condiciones óptimas: 1 g/L $H_2O_2$ ; 0,2 mg/L reactivo fenton pH 5. Tiempo: 3 h %Degradación: 82,5% Grado de mineralización: 42,5%
Análisis de alcance investigación	Se evidencia la degradación del compuesto bajo condiciones adecuadas de los reactivos.
Conceptos abordados	Foto fenton, Espectrofotometría UV/Vis, DQO.
Publicaciones similares	REINOSA OSORIO, P.A., 2009. <i>Degradación de resorcinol por Fotocátalisis Heterogénea mediada por <math>TiO_2</math> y <math>H_2O_2</math></i> . Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

Fuente:(74)

Tabla 31. Ficha bibliográfica: Laina Agudelo, 2010

DATOS DEL TRABAJO	
Título de la publicación	Degradación de la fluoresceína sódica por fotocátalisis heterogénea en un reactor heliofotocatalítico.
Fecha de publicación	2010
Autor/es	Jhon Mauro Laina Agudelo
Palabras clave	Fotocatálisis heterogénea, Fluoresceína sódica, $\text{TiO}_2$ , $\text{H}_2\text{O}_2$ , COT, DQO, Espectrofotometría UV/Vis
Lugar de creación	Pereira, Risaralda
ANÁLISIS TRABAJO	
Descripción publicación	Se realizan ensayos aplicando la técnica de fotocátalisis heterogénea para la degradación de Fluoresceína residual de la práctica 8 del laboratorio de química orgánica, usando un reactor artesanal que usa lámparas UV cercano y un reactor heliofotocatalítico, realizando a su vez algunas variaciones en cuanto a concentración del contaminante, oxidante ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) y fotocatalizador ( $\text{TiO}_2$ ); para encontrar bajo que metodología se encuentran mejores resultados en cuanto a su porcentaje de degradación primaria y mineralización.
Objetivo	Degradar la fluoresceína sódica por medio de fotocátalisis heterogénea en un Reactor Heliofotocatalítico Cilindro Parabólico Compuesto.
Anotaciones de metodología utilizada	<p><u>Técnica:</u> Ensayos con Fotocatálisis heterogénea: solar y asistida por lámparas UV visible</p> <p><u>Equipos:</u> Reactor de bandeja con luz UV cercano artificial. Reactor heliofotocatalítico Cilindro parabólico compuesto.</p> <p><u>Metodología:</u> Se realizaron ensayos en reactor Heliofotocatalítico Cilindro parabólico y en reactor artesanal, con el residuo de laboratorio de fluoresceína sódica; las condiciones del proceso como concentración del fotocatalizador y de concentración fueron elegidas por el autor de manera arbitral, teniendo en cuenta literatura. Las condiciones fueron: 1) dos ensayos en un reactor solar+ 10% solución Fluoresceína residual + 14g <math>\text{TiO}_2</math> + Luz solar; 2) Reactor solar+ 3,125% solución Fluoresceína residual+ 16g <math>\text{TiO}_2</math> + 8 mL <math>\text{H}_2\text{O}_2</math> (5 repeticiones); 3) ensayos Reactor artesanal + 3,125% solución Fluoresceína residual + 16g <math>\text{TiO}_2</math>+ 8 mL <math>\text{H}_2\text{O}_2</math> (4 repeticiones). <u>Métodos de análisis:</u> Espectrofotometría UV/Vis (degradación), DQO y COT (mineralización)</p>
Resultados destacables	La Fluoresceína sódica tiene un % de degradación primaria del 100% bajo las condiciones 2.
Análisis de alcance investigación	Ésta investigación tiene gran alcance pues muestra tres aspectos fundamentales que al momento no habían sido analizado en los ensayos de fotocátalisis heterogénea en la Escuela de Química: influencia de la irradiación solar en la eficiencia fotónica; la eficiencia del proceso de fotocátalisis heterogénea solar (100%D.P); la influencia del oxidante en la reacción; la aplicación del análisis COT. El autor sugiere investigación para optimizar condiciones de concentración del $\text{TiO}_2$ , $\text{H}_2\text{O}_2$ , flujo, pH y concentración de Fluoresceína.
Conceptos abordados	Reactores heliofotocatalítico Cilindro Parabólico, Fotocatálisis heterogénea, DQO, COT, Espectrofotometría UV/Vis.
Publicaciones similares en GIFES	SOTO ARENAS, C.A. y LÓPEZ FLÓREZ, G.A., 2009. <i>Degradación fotocatalítica de la fluoresceína</i> [en línea]. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. [Consulta: 28 marzo 2016]. Disponible en: <a href="http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/dspace/handle/11059/1786">http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/dspace/handle/11059/1786</a> .

Fuente: (100)

Tabla 32. Ficha bibliográfica: Velásquez Salas, 2011

DATOS DEL TRABAJO	
Título de la publicación	Degradación de 1-hidroxi-4-metilbenceno mediante Fotocatálisis heterogénea en un reactor Heliofotocatalítico
Fecha de publicación	2011
Autor/es	Julián David Velásquez Salas
Palabras clave	1-hidroxi-4-metilbenceno, Fotocatálisis heterogénea, $\text{TiO}_2$ , $\text{H}_2\text{O}_2$ , reactor heliofotocatalítico CPC, DQO, COT, Espectrofotometría UV/Vis.
Lugar de creación	Pereira, Risaralda
ANÁLISIS TRABAJO	
Descripción publicación	Este trabajo señala los resultados y análisis obtenidos de la degradación del 1-hidroxi-4-metilbenceno mediante la Fotocatálisis heterogénea usando como catalizador el $\text{TiO}_2$ y como oxidante el $\text{H}_2\text{O}_2$ .
Objetivo	Degradar el 1-hidroxi-4-metilbenceno por fotocatálisis heterogénea en un reactor Heliofotocatalítico.
Anotaciones de metodología utilizada	<p><u>Técnica:</u> Fotocatálisis heterogénea: solar y asistida por lámparas UV visible</p> <p><u>Equipos:</u> Reactor tipo Batch de bandeja con luz UV cercano artificial. Reactor heliofotocatalítico Cilindro parabólico compuesto.</p> <p><u>Metodología:</u> Se realizaron ensayos en reactor artesanal, donde se obtuvieron las condiciones óptimas de degradación del 1-hidroxi-4-metilbenceno en cuanto a concentración del <math>\text{TiO}_2</math>, <math>\text{H}_2\text{O}_2</math> y pH. Posteriormente se realizó el ensayo en el reactor Heliofotocatalítico con las condiciones obtenidas, para establecer el porcentaje de degradación primaria y la cinética de la reacción. La medición del fenol por espectrofotómetro requirió una preparación previa, descrita en el numeral 6.1.5. del trabajo.</p> <p><u>Método de análisis:</u> Espectrofotometría UV/Vis (degradación); DQO y COT (mineralización)</p> <p><u>Interpretación de datos:</u> ANOVA</p>
Resultados destacables	<p>Las condiciones óptimas encontradas fueron: <math>\text{TiO}_2</math>, 0,7 g /L; <math>\text{H}_2\text{O}_2</math>, 700ppm; pH, 2,0.</p> <p>%Degradación: 40,58% (2h); 99% (13h, 31 min).</p> <p>Grado de mineralización: 27,47%</p> <p>Reacción de orden dos.</p> <p>Intensidad lumínica promedio: 304,68 <math>\text{W/m}^2</math></p>
Análisis de alcance investigación	La investigación, además de evaluar las condiciones químicas de operación, también tiene en cuenta las condiciones que afectan los resultados de la aplicación de la técnica como son la intensidad lumínica promedio y el flujo del contaminante en el reactor Heliofotocatalítico (72,73 mL/s). Adicionalmente, se realiza el cálculo del límite de detección y el límite de cuantificación, lo cual permite conocer la sensibilidad del método y los límites de cuantificación más exactos.
Conceptos abordados	Reactores heliofotocatalítico Cilindro Parabólico, Fotocatálisis heterogénea, DQO, COT, Espectrofotometría UV/Vis.

Fuente: (101)



Tabla 33. Ficha bibliográfica: Carvajal Gómez y Jiménez Coqueco, 2012

DATOS DEL TRABAJO	
Título de la publicación	Evaluación de la degradación por fotocatálisis heterogénea en un reactor artesanal y heliofotocatalítico del ácido 3, 5-dinitrosalicílico (DNS)
Fecha de publicación	2012
Autor/es	Ángela María Carvajal Gómez Leidy Johana Jiménez Coqueco
Palabras clave	Acido 3,5-Dinitrosalicílico, Fotocatálisis heterogénea, TiO <sub>2</sub> , reactor heliofotocatalítico CPC, <i>Artemia salina</i> , DBO <sub>5</sub> , DQO, COT, Espectrofotometría UV/Vis.
Lugar de creación	Pereira, Risaralda
ANÁLISIS TRABAJO	
Descripción publicación	En el trabajo se realizan análisis de la degradación del compuesto ácido 3,5-Dinitrosalicílico, mediante la aplicación de fotocatálisis heterogénea, usando un reactor tipo batch con una muestra sintética, con el fin de establecer las mejores condiciones de operación y ensayos en un reactor heliofotocatalítico CPC con una muestra real de los desechos en el laboratorio de química. Los autores, realizan ensayos químicos y toxicológicos para el análisis del producto de la degradación.
Objetivo	Realizar el estudio de la degradación fotocatalítica del Ácido 3,5-Dinitrosalicílico bajo las condiciones óptimas en un reactor heliofotocatalítico tipo Cilindro Parabólico Compuesto (CPC) y en un reactor tipo batch.
Anotaciones de metodología utilizada	<p><u>Técnica:</u> Fotocatálisis heterogénea: solar y asistida por lámparas UV.</p> <p><u>Equipos:</u> Reactor heliofotocatalítico Cilindro Parabólico Compuesto (CPC) y en un reactor tipo batch.</p> <p><u>Metodología:</u> se estableció una concentración del DNP en el residual del laboratorio de 10000ppm, por tanto, se realizó el análisis de la concentración adecuada para el análisis por Espectrofotometría UV/Vis (20ppm); se evalúa la absorbancia a diferentes pH, debido a su influencia en la el cambio químico de la sustancia; se realizan ensayos en el reactor tipo batch con una solución preparada a 20ppm, para encontrar el tiempo de operación suficiente para degradar y las mejores condiciones de concentración de pH, TiO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; así mismo en éste reactor se evalúa todos los métodos análisis para compararlos más adelante con los resultados en un reactor Heliofotocatalítico CPC, en donde se replican las mejores condiciones encontradas con una muestra real tomada de los residuos del laboratorio.</p> <p><u>Métodos de análisis:</u> Espectrofotometría UV/vis, DBO<sub>5</sub>, COT, DQO, Análisis toxicidad biológica (<i>Artemia salina</i>)</p> <p><u>Análisis de datos:</u> ANOVA</p>
Resultados destacables	<p>Las mejores condiciones encontradas fueron: TiO<sub>2</sub>, 0,7 g /L; H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 300ppm; pH, 4,0.</p> <p>Tiempo de operación: 4h</p> <p>Longitud de onda: 336 (pH 4 y 6), 370nm (pH 8).</p> <p><u>Reactor tipo batch + muestra preparada 20ppm:</u></p> <p>%Degradación: 96%</p> <p>Grado de mineralización: 27,53%</p> <p>Biodegradabilidad: no se determinó</p> <p>Toxicidad: 100%</p>

	Reacción de primer orden. <u>Reactor heliofotocatalítico + muestra real:</u> %Degradación: 53,37% Grado de mineralización: 27,53% Biodegradabilidad: no se determinó Toxicidad: 80% Radiación solar promedio: 253,11 W/m <sup>2</sup>
Análisis del alcance de la investigación	La investigación elucida la influencia de los contaminantes intermediarios, siendo importante no solo el cálculo de la desaparición del contaminante de interés sino de evaluar el nivel de toxicidad del producto final en las condiciones de operación más eficientes y viables económicamente. También muestra la diferencia de resultados entre la degradación de un compuesto aislado y una matriz con múltiples compuestos. Adicionalmente, queda claro la importancia de conocer datos ambientales como la radiación solar.
Conceptos abordados	Fotocatálisis heterogénea, DBO <sub>5</sub> , DQO, COT, Espectrofotometría UV/Vis, ensayos de toxicidad <i>Artemia salina</i> .
Publicaciones similares	ARIAS ORTIZ, D.L. y PIZZA LONDONO, V.E., 2014. <i>Evaluación de la degradación del ácido 3,5-dinitrosalicílico mediante fotocatalisis homogénea en un reactor de recirculación y reactor solar CPC de la escuela de química de la Universidad Tecnológica de Pereira</i> . Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

Fuente: (102)

Tabla 34. Ficha bibliográfica: Arias Ortiz y Pizza Londoño, 2014

DATOS DEL TRABAJO	
Título de la publicación	Evaluación de la degradación del ácido 3,5-dinitrosalicílico mediante fotocátalisis homogénea en un reactor de recirculación y reactor solar CPC de la escuela de química de la Universidad Tecnológica de Pereira.
Fecha de publicación	2014
Autor/es	Diana Lorena Arias Ortiz Victoria Eugenia Pizza Londoño
Palabras clave	Acido 3,5-Dinitrosalicílico, Fotocátalisis homogénea, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , FeCl <sub>3</sub> , reactor de recirculación, reactor solar CPC, <i>Artemia salina</i> , DQO, COT, Espectrofotometría UV/Vis.
Lugar de creación	Pereira, Risaralda
ANÁLISIS TRABAJO	
Descripción publicación	En éste trabajo se muestran los resultados de investigar la degradación del Ácido 3,5- Dinitrosalicílico a 20ppm por Fotocátalisis homogénea (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /FeCl <sub>3</sub> /UV) en un reactor de recirculación asistido por lámparas UV y un reactor solar CPC, comparando los resultados obtenidos con la aplicación de la Fotocátalisis heterogénea (Carvajal Gómez y Jimenez Coqueco 2012). Los autores usaron métodos de análisis químicos y toxicológicos.
Objetivo	Estudiar la degradación del Ácido 3,5- Dinitrosalicílico (DNS) mediante Fotocátalisis Homogénea, en el Reactor de Recirculación y Reactor Solar CPC y comparar los resultados obtenidos en este estudio con los resultados del trabajo de grado: Evaluación de la degradación por Fotocátalisis Heterogénea en un Reactor Artesanal y Heliofotocatalítico del Ácido 3,5-dinitrosalicílico, en la Universidad Tecnológica de Pereira en el año 2012.
Anotaciones de metodología utilizada	<u>Técnica:</u> Fotocátalisis homogénea <u>Equipos:</u> Reactor de recirculación con fuente de iluminación Philips TL-D 36W/18 Black SLV a 365nm; reactor solar CPC <u>Metodología:</u> Se estableció rango de pH adecuado; se realizaron ensayos variando el pH, concentración de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y FeCl <sub>3</sub> en el reactor de recirculación (asistido con lámpara UV), donde se eligieron las mejores condiciones y se calculó la cinética de la reacción; se escaló los resultados a un reactor solar CPC, teniendo en cuenta la radiación solar. <u>Métodos de análisis:</u> Espectrofotometría UV/Vis (%degradación primaria) y COT y DQO (%mineralización y degradación secundaria), ensayos toxicológicos con <i>Artemia salina</i> <u>Análisis de datos:</u> ANOVA
Resultados destacables	Las mejores condiciones encontradas fueron: FeCl <sub>3</sub> , 500 ppm; H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , 300ppm; pH, 3,0. Tiempo de operación: 4h Longitud de onda: 334 <u>Reactor de recirculación</u> %Degradación: 83,88% Grado de mineralización: 66,1% Toxicidad: 100% muertes Reacción de orden uno <u>Reactor solar CPC</u>

	%Degradación: 76,18% Grado de mineralización: 67,68% Toxicidad: 100% muertes Reacción de orden uno Intensidad lumínica promedio: 215,33 W sobre el colector.
Análisis de alcance investigación	Se evidencia que la aplicación de la técnica de fotocátalisis homogénea es más eficiente comparada con la fotocátalisis heterogénea, de acuerdo a la degradación y mineralización del DNS; se evidencia que el nivel de toxicidad es el máximo (100% muertes) después y antes de la degradación, lo que deja entre dicho la toxicidad del producto de la degradación.
Conceptos abordados	Fotocátalisis homogénea, DQO, COT, Espectrofotometría UV/Vis, ensayos toxicológicos <i>Artemia salina</i> .
Publicaciones similares	CARVAJAL GÓMEZ, A.M. y JIMENEZ COQUECO, L.J., 2012. <i>Evaluación de la degradación por fotocátalisis heterogénea en un reactor artesanal y heliofotocatalítico del ácido 3, 5-dinitrosalicílico</i> [en línea]. S.l.: s.n. [Consulta: 28 marzo 2016]. Disponible en: <a href="http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/dspace/handle/11059/2937">http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/dspace/handle/11059/2937</a> .

Fuente:(75)

Tabla 35. Ficha bibliográfica: Cruz Betancurt y Torijano Mina, 2014)

DATOS DEL TRABAJO	
Título de la publicación	Degradación por fotocátalisis homogénea en reactor artesanal y heliofotocatalítico del 1-hidroxi-4-metilbenceno
Fecha de publicación	2014
Autor/es	Estefanía Cruz Betancur Julieth Marcela Torijano Mina
Palabras clave	1-hidroxi-4-metilbenceno, Fotocátalisis homogénea, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , FeCl <sub>3</sub> , reactor tipo batch, reactor heliofotocatalítico CPC, <i>Artemia salina</i> , DQO, DBO <sub>5</sub> , COT, Espectrofotometría UV/Vis.
Lugar de creación	Pereira, Risaralda
ANÁLISIS TRABAJO	
Descripción publicación	Se realizan análisis para la degradación por Fotocátalisis homogénea del 1-hidroxi-4-metilbenceno, con reactores tipo batch y heliofotocatalítico CPC, donde se evalúan las mejores condiciones de operación con relación a la degradación; se evalúa la toxicidad del producto final; se realiza una comparación con la aplicación de la técnica de fotocátalisis heterogénea para el mismo compuesto.
Objetivo	Estudiar la degradación del 1-hidroxi-4-metilbenceno, por fotocátalisis homogénea compuesto proveniente de los desechos de aguas residuales de la escuela de química de la Universidad Tecnológica de Pereira.
Anotaciones de metodología utilizada	<p><u>Técnica:</u> Fotocátalisis homogénea</p> <p><u>Equipos:</u> Reactor tipo batch, reactor heliofotocatalítico CPC</p> <p><u>Metodología:</u> se realizaron ensayos variando el pH, concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y FeCl<sub>3</sub> en el reactor tipo batch, donde se eligieron las mejores condiciones y se calculó la cinética de la reacción; se escaló los resultados a un reactor solar CPC.</p> <p><u>Métodos de análisis:</u> Espectrofotometría UV/Vis (%degradación primaria) y COT y DQO (%mineralización y degradación secundaria), ensayos toxicológicos con <i>Artemia salina</i></p> <p><u>Análisis de datos:</u> ANOVA</p>
Resultados destacables	<p>Las mejores condiciones encontradas fueron: FeCl<sub>3</sub>, 40 ppm; H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 700ppm; pH, 2,5.</p> <p>Tiempo de operación: 3h</p> <p>Longitud de onda: 510nm</p> <p><u>Reactor tipo batch</u></p> <p>%Degradación primaria: 79,1%</p> <p>%Degradación secundaria: 30%</p> <p>Grado de mineralización: 10,53%</p> <p>Toxicidad: 70% muertes</p> <p>Reacción de orden uno</p> <p><u>Reactor de solar CPC</u></p> <p>%Degradación primaria: 78,62%</p> <p>%Degradación secundaria: 35%</p> <p>Grado de mineralización: 12,46%</p> <p>Toxicidad: 46,7% muertes</p> <p>Reacción de orden dos.</p>

Análisis de alcance investigación	Se evidencia que la aplicación de la técnica de fotocatálisis homogénea es más eficiente comparada con la fotocatálisis heterogénea con relación a la degradación y mineralización del 1-hidroxi-4-metilbenceno ya estudiada por Velásquez Salas, J.D, 2011.
Conceptos abordados	Fotocatálisis homogénea, DQO, DBO <sub>5</sub> , COT, Espectrofotometría UV/Vis, ensayos toxicológicos <i>Artemia salina</i> .
Publicaciones similares	VELÁSQUEZ SALAS, J.D., 2011. <i>Degradación de 1-hidroxi-4-metilbenceno mediante fotocatálisis heterogénea en un reactor heliofotocatalítico</i> [en línea]. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. [Consulta: 28 marzo 2016]. Disponible en: <a href="http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/dspace/handle/11059/1797">http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/dspace/handle/11059/1797</a> .

Fuente: (103)

Tabla 36. Ficha bibliográfica: Peñaloza y Tobón Carvajal, 2014

DATOS DEL TRABAJO	
Título de la publicación	Evaluación de la degradación del colorante amarillo reactivo, útil en la industria textil por fotodegradación con métodos comparativo entre catálisis heterogénea (TiO <sub>2</sub> ) y homogénea (foto-fenton)
Fecha de publicación	2014
Autor/es	Mario Alejandro Peñaloza Yamile Alejandra Tobón Carvajal
Palabras clave	Amarillo reactivo, Fotocatálisis heterogénea, fotocatálisis homogénea, TiO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , FeCl <sub>3</sub> , reactor tipo batch, <i>Artemia salina</i> , DQO, DBO <sub>5</sub> , COT, Espectrofotometría UV/Vis.
Lugar de creación	Pereira, Risaralda
ANÁLISIS TRABAJO	
Descripción publicación	Se analizan resultados de la degradación del amarillo reactivo (NovacronYellow LS-4G) mediante un reactor batch aplicando las técnicas de fotocatálisis heterogénea y homogénea, encontrando las condiciones mejores para obtener mejores resultados de degradación, mineralización y toxicidad, además realiza comparación entre las dos técnicas.
Objetivo	Evaluar la degradación del colorante amarillo reactivo, útil en la industria textil por fotocatálisis Heterogénea (TiO <sub>2</sub> ) y Homogénea (Foto-Fenton).
Anotaciones de metodología utilizada	<p><u>Técnica:</u> Fotocatálisis homogénea y heterogénea</p> <p><u>Equipos:</u> Reactor tipo batch</p> <p><u>Metodología:</u> se calcula la concentración del amarillo reactivo en donde el TiO<sub>2</sub> se satura; se evalúa el máximo de absorción de acuerdo al pH de la solución; se calcula el tiempo de operación donde se obtiene mejores resultados; se realizan ensayos por fotocatálisis homogénea variando el pH, concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y FeCl<sub>3</sub> en el reactor tipo batch y por fotocatálisis heterogénea variando el pH, concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y TiO<sub>2</sub>, de donde se eligieron las mejores condiciones; se calculó la cinética de la reacción..</p> <p><u>Métodos de análisis:</u> Espectrofotometría UV/Vis, COT, DQO, DBO<sub>5</sub>, ensayos toxicológicos con <i>Artemia salina</i></p> <p><u>Análisis de datos:</u> ANOVA</p>
Resultados destacables	<p>Las mejores condiciones encontradas fueron:</p> <p><u>Fotocatálisis homogénea:</u> FeCl<sub>3</sub>, 30 ppm; H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 200ppm; pH, 3. Tiempo operación: 80min. %Degradación primaria: 91,16% Grado de mineralización: 77,97% Toxicidad: 88,3%</p> <p><u>Fotocatálisis heterogénea:</u> TiO<sub>2</sub>, 700 ppm; H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 300ppm; pH, 4. Tiempo operación: 200min. %Degradación primaria: 99,2% Grado de mineralización: indeterminado Toxicidad: 95%</p>
Análisis de alcance	Se obtienen resultados favorables para la aplicación de ambas técnicas,

investigación	sin embargo, la fotocatalisis homogénea es más eficiente que la heterogénea debido a que el tiempo de operación es mucho menor, 80min frente a 200min de la fotocatalisis heterogénea, considerándose una pequeña diferencia en la degradación primaria. Se evidenció que para el caso de la fotocatalisis heterogénea se aumenta la DQO y DBO <sub>5</sub> , debido a la aparición de nuevos contaminantes intermediarios.
Conceptos abordados	Fotocatalisis homogénea, fotocatalisis heterogénea, DQO, DBO <sub>5</sub> , COT, Espectrofotometría UV/Vis, ensayos toxicológicos <i>Artemia salina</i> .

Fuente: (104)



Tabla 37. Ficha bibliográfica: Baicue, 2015

DATOS DEL TRABAJO	
Título de la publicación	Degradación del azul de metileno y verde de malaquita por fotocátalisis heterogénea utilizando dióxido de titanio dopado con nitrógeno (N-TiO <sub>2</sub> ) bajo luz visible
Fecha de publicación	2015
Autor/es	Juan Sebastian Baicue
Palabras clave	Azul de metileno, verde de malaquita, Dióxido de titanio dopado (N-TiO <sub>2</sub> ), método Pechini, fotocátalisis heterogénea.
Lugar de creación	Pereira, Risaralda
ANÁLISIS TRABAJO	
Descripción publicación	El autor realiza el dopaje mediante método Pechini del TiO <sub>2</sub> con nitrato de amonio, para realizar la degradación de azul de metileno y verde de malaquita en un reactor artesanal asistido por lámpara UV, y un reactor heliofotocatalítico, con el fin de encontrar las mejores condiciones de operación para su degradación.
Objetivo	Degradar el azul de metileno y el verde de malaquita por fotocátalisis heterogénea empleando como catalizador TiO <sub>2</sub> dopado con nitrógeno usando luz visible en un reactor con lámpara y solar en el reactor heliofotocatalítico.
Anotaciones de metodología utilizada	<p><u>Técnica:</u> Fotocátalisis heterogénea</p> <p><u>Equipos:</u> Reactor artesanal con lámpara, reactor heliofotocatalítico.</p> <p><u>Metodología:</u> Se realiza dopaje de TiO<sub>2</sub> con nitrato de amonio aplicando el método Pechini. Se realiza la degradación del azul de metileno y verde de malaquita en el reactor artesanal con lámpara para establecer las mejores condiciones y la cinética de reacción; se escala las condiciones encontradas en el reactor solar y se calcula la cinética de la reacción.</p> <p><u>Métodos de análisis:</u> Espectrofotometría UV/Vis, COT, DQO, DBO<sub>5</sub>,</p> <p><u>Análisis de datos:</u> ANOVA</p>
Resultados destacables	<p>Las mejores condiciones encontradas fueron:</p> <p>Azul de metileno: 6mg/L azul de metileno; 0,6g/L N-TiO<sub>2</sub>; pH 3.</p> <p>Verde de malaquita: 6mg/L verde de malaquita; 0,6g/L N-TiO<sub>2</sub>; pH 4.</p> <p><u>Reactor artesanal:</u></p> <p>Azul de metileno:</p> <p>%Degradación: 71,28%</p> <p>Grado de mineralización: 42,12%</p> <p>Verde de malaquita:</p> <p>%Degradación: 90,507%</p> <p>Grado de mineralización: 65,60%</p> <p><u>Reactor heliofotocatalítico:</u></p> <p>Azul de metileno:</p> <p>%Degradación: 96,658%</p> <p>Grado de mineralización: 51,62%</p> <p>Radiación promedio: 537,67 W/m<sup>2</sup></p> <p>Verde de malaquita:</p> <p>%Degradación: 93,774%; Grado de mineralización: 35,31%</p>
Análisis de alcance investigación	La investigación encuentra actividad fotocatalítica del N-TiO <sub>2</sub> , encontrándose porcentajes de degradación y mineralización altos.
Conceptos abordados	Fotocátalisis heterogénea, DQO, DBO <sub>5</sub> , COT, Espectrofotometría UV/Vis.

Fuente: (105)

Tabla 38. Ficha bibliográfica Galvis y Osorio 2015.

DATOS DEL TRABAJO	
Título de la publicación	Evaluación de la degradación de una mezcla de colorantes residuales originados en el laboratorio de Química Orgánica II de la Escuela de Química de la Universidad Tecnológica de Pereira mediante fotocátalisis homogénea (foto-fenton) utilizando un reactor solar.
Fecha de publicación	2015
Autor/es	Digzi Paulin Galvis Escalante Laura Osorio Quintero
Palabras clave	Fotocátalisis homogénea, colorantes, reactivo Fenton, reactor solar, DQO, <i>Artemia salina</i> .
Lugar de creación	Pereira, Risaralda
ANÁLISIS TRABAJO	
Descripción publicación	El autor realiza ensayos para definir las condiciones óptimas en cuanto a concentración del oxidante ( $H_2O_2$ ) y del reactivo Fenton, teniendo como variable de salida el porcentaje de degradación y la DQO de la degradación de una mezcla de colorantes residuales originados en la Escuela de Química. Usa un reactor asistido con lámparas UV cercano para conocer las variables óptimas, posteriormente extrapola la aplicación de la técnica con un reactor solar. El autor realiza ensayos de toxicidad usando <i>Artemia salina</i> .
Objetivo	Evaluar y encontrar las condiciones óptimas de degradación de una mezcla de colorantes residuales originados en el laboratorio de química orgánica II de la escuela de química de la Universidad Tecnológica de Pereira mediante fotocátalisis homogénea (Foto-Fenton) utilizando un reactor solar.
Anotaciones de metodología utilizada	<p><u>Técnica:</u> Ensayos con Fotocátalisis homogénea: solar y asistida por lámparas UV visible</p> <p><u>Equipos:</u> Reactor artesanal tipo Batch con lámpara UV cercano. Reactor solar.</p> <p><u>Metodología:</u> en un reactor artesanal tipo Batch con luz UV se realizaron tres ensayos, en el primero se evalúa la mínima dilución que permitiera una degradación eficiente de la mezcla de colorantes y el tiempo requerido; en el segundo, con la dilución obtenida se halló la concentración óptima de <math>Fe^{3+}</math> y en el último ensayo se evaluó la concentración del <math>H_2O_2</math>. En el reactor solar, con las condiciones óptimas conocidas, se realizó el seguimiento de la degradación. Se realizó análisis de DQO a las alícuotas tomadas cada 10 min. Se realizó el análisis de toxicidad a la solución madre de colorante, la solución degradada en el reactor artesanal tipo Batch, y a la solución degradada en el reactor solar.</p> <p><u>Métodos de análisis:</u> Espectrofotometría UV/Vis (degradación), DQO y <i>Artemia salina</i>.</p>

Resultados destacables	<p>pH solución: 2,8 a 3 de acuerdo a literatura consulta por el autor.  Tiempo operación: 2,5 h (ambos reactores)  Longitud onda máxima absorbancia: 357 nm  Condiciones óptimas de proceso:  Concentración de la mezcla de colorantes: 12mL de colorantes/100mL de solución  Concentración Fe<sup>3+</sup>: 70ppm  Concentración H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: 300ppm  <u>Reactor con lámpara UV:</u>  % degradación: 95,7%  %disminución DQO: 69%  Toxicidad: 100% de supervivencia de la larva  <u>Reactor solar:</u>  % degradación: 96,9%  % disminución DQO: 81%  Toxicidad: 100% de supervivencia de la larva</p>
Análisis de alcance investigación	Se demuestra la eficiencia de la aplicación de la técnica de fotocátalisis homogénea para la degradación de una mezcla de colorantes. Se encuentra además la posibilidad de usar radiación solar en la degradación, que además de ser una fuente más económica que la lámpara UV, acelera la disminución del color y de la DQO, por lo que según los ensayos realizados, es más eficiente.
Conceptos abordados	Reactor solar, reactor artesanal con lámpara UV, Fotocátalisis heterogénea, Espectrofotometría UV/Vis, DQO, análisis toxicidad <i>Artemia salina</i> .
Publicaciones similares en GIFES	PENALOZA, M.A. y TOBÓN CARVAJAL, Y.A., 2014. <i>Evaluación de la degradación del colorante amarillo reactivo, útil en la industria textil por fotodegradación con métodos comparativo entre catálisis heterogénea (TiO<sub>2</sub>) y homogénea (foto-fenton)</i> . Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

Fuente: (106)

Tabla 39. Ficha bibliográfica Hernández y Ramírez 2015

DATOS DEL TRABAJO	
Título de la publicación	Evaluación de la fotodegradación del colorante Naranja II reutilizando sulfuro de cadmio (CdS) obtenido como residuo.
Fecha de publicación	2015
Autor/es	Natalia Hernández Jiménez Yuliana Ramírez Castaño
Palabras clave	Fotocatálisis homogénea, y heterogénea, sulfuro de cadmio, naranja II, Espectroscopía RAMAN, microscopía electrónica de barrido (SEM), Espectroscopía de energía dispersa (EDS), reflectancia difusa, Espectrofotometría UV/Vis, DQO.
Lugar de creación	Pereira, Risaralda
ANÁLISIS TRABAJO	
Descripción publicación	El autor realiza la recuperación de CdS producto de análisis de cationes realizado en las prácticas de laboratorio de química analítica y realiza la caracterización por diferentes técnicas espectrofotométricas buscando conocer su grado de pureza y su capacidad semiconductora (Band gap), una vez caracterizado el sólido, realiza ensayos de fotodegradación del Naranja II preparado mediante síntesis química. en la investigación se evalúa la relación óptima de la concentración del CdS y el naranja II, además la influencia del pH en la estabilidad del colorante y en la técnica.
Objetivo	Llevar a cabo la foto-degradación del Naranja II con el residuo Sulfuro de Cadmio.
Anotaciones de metodología utilizada	<p><u>Técnica:</u> Ensayos con Fotocatálisis homogénea y heterogénea asistida por lámparas UV visible.</p> <p><u>Equipos:</u> Reactor artesanal tipo Batch con lámpara UV.</p> <p><u>Metodología:</u> se realiza la caracterización del CdS residual de las prácticas de laboratorio de química analítica; posteriormente se realiza la preparación del Naranja II mediante síntesis química; se realizan ensayos para la estabilidad del colorante al análisis por Espectrofotometría y se hacen variación de la concentración del oxidante H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, y concentración de CdS. se realiza seguimiento mediante Espectrofotometría UV/Vis de la decoloración del Naranja II y análisis de DQO.</p> <p><u>Métodos de análisis:</u> Espectroscopía RAMAN, microscopía electrónica de barrido (SEM), Espectroscopía de energía dispersa (EDS), Reflectancia difusa, Espectroscopía UV/Vis (degradación), DQO</p>
Resultados destacables	<p>pH estabilidad Naranja II: 8</p> <p>Longitud onda máxima absorbancia: 480 nm</p> <p>Mejores condiciones del proceso:</p> <p>Concentración del colorante: <math>1 \times 10^{-5}</math> M</p> <p>Concentración H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: 900ppm</p> <p>Concentración CdS: <math>5 \times 10^{-5}</math></p> <p>Pureza del residuo: 46% de CdS</p> <p>Los resultados obtenidos para el foto fenton no fueron concluyentes debido a que el pH en que se estabiliza el colorante es básico (pH=8) y la oxidación de Fe<sup>+2</sup> a Fe<sup>+3</sup> se da a pH ácido.</p>

Análisis de alcance investigación	El CdS recuperado no tiene la suficiente pureza para ser usado como fotocatalizador, por lo que el autor sugiere en futuras investigaciones realizar un tratamiento preliminar del mismo; además, la estabilidad del colorante Naranja II es a un pH básico por lo que la aplicación de de Foto fenton no fue posible.
Conceptos abordados	Reactor artesanal con lámpara UV, Fotocatálisis heterogénea y heterogénea, Espectrofotometría UV/Vis, DQO.
Publicaciones similares en GIFES	N/A

Fuente: (107)

Tabla 40. Ficha bibliográfica Cárdenas 2015

DATOS DEL TRABAJO	
Título de la publicación	Degradación del colorante Novacrón Red LS-BN presente en el agua residual del proceso de tinción mediante fotocátalisis heterogénea con el catalizador soportado sobre vidrio en un reactor fotocatalítico.
Fecha de publicación	2015
Autor/es	Gina Yiredy Cárdenas Giraldo
Palabras clave	Fotocatálisis heterogénea, $TiO_2$ , método Pechini, Novacrón Red LS-BN, Espectrofotometría UV/Vis, DQO, $DBO_5$ y COT
Lugar de creación	Pereira, Risaralda
ANÁLISIS TRABAJO	
Descripción publicación	El autor realiza la preparación del sustrato de vidrio pyrex, donde se soporta el catalizador $TiO_2$ usando el método Pechini; los cilindros obtenidos fueron sometidos a pruebas físicas y químicas para evaluar su estabilidad. El autor realizó ensayos para obtener las mejores condiciones para la degradación de una muestra de NOVACRON RED LS-BN recolectada en la empresa Coats Cadena Andina S.A. en reactor tipo Batch, realizando en paralelo el seguimiento de la degradación usando $TiO_2$ en suspensión.
Objetivo	Degradar el colorante NOVACRON RED LS-BN presente en el agua residual del proceso de tinción, mediante fotocátalisis heterogénea con el catalizador soportado sobre vidrio en un reactor fotocatalítico
Anotaciones de metodología utilizada	<p><u>Técnica:</u> Ensayos con Fotocatálisis heterogénea asistida por lámparas UV visible</p> <p><u>Equipos:</u> Reactor artesanal tipo Batch con lámpara UV cercano.</p> <p><u>Metodología:</u> se prepara cilindros de vidrio pyrex con <math>TiO_2</math> soportado; se realizan análisis de estabilidad; en un reactor artesanal tipo Batch con luz UV se realizaron ensayos variando la concentración de <math>H_2O_2</math> (300, 500 y 700ppm), pH (3, 7 y 9) a una concentración constante del contaminante (10ppm NR) y del <math>TiO_2</math> (100 ppm) en suspensión y soportado. Se calculó la cinética de la reacción, análisis de DQO, <math>DBO_5</math> y COT.</p> <p><u>Métodos de análisis:</u> Espectrofotometría UV/Vis (degradación), DQO, <math>DBO_5</math> y COT.</p>
Resultados destacables	<p>Longitud onda máxima absorbancia: 525 nm</p> <p>Condiciones óptimas de proceso:</p> <p>pH: 3</p> <p>Concentración de colorante: 10ppm</p> <p>Concentración <math>H_2O_2</math>: 500ppm</p> <p>Concentración <math>TiO_2</math>: 100ppm</p> <p><u>Usando <math>TiO_2</math> en suspensión:</u></p> <p>% degradación: 92,66%</p> <p>%mineralización: 89,47%</p> <p><u>Usando <math>TiO_2</math> soportado:</u></p> <p>% degradación: 89,91%</p> <p>% mineralización: 70,64%</p>

Análisis de alcance investigación	El método usado para reciclar material de vidrio pyrex desechado tuvo buenos resultados, pues se suficientemente resistente a las pruebas físicas y químicas y al proceso de degradación no se observó pérdida de peso en los cilindros y podría ser muy duradero. La degradación con el catalizador soportado es inferior al uso de catalizador en suspensión, sin embargo su valor es considerablemente alto, por lo que se presenta como una buena opción para evitar la filtración del catalizador usándolo en suspensión, ayudando además a disminuir costos.
Conceptos abordados	Reactor artesanal con lámpara UV, Fotocatálisis heterogénea, método Pechini, Espectrofotometría UV/Vis, DQO, DBO <sub>5</sub> y COT.
Publicaciones similares en GIFES	PENALOZA, M.A. y TOBON CARVAJAL, Y.A., 2014. <i>Evaluación de la degradación del colorante amarillo reactivo, útil en la industria textil por fotodegradación con métodos comparativo entre catálisis heterogénea (TiO<sub>2</sub>) y homogénea (foto-fenton)</i> . Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

Fuente: (108)

## 12. BIBLIOGRAFÍA

1. Vélez CM. Apuntes de metodología de la investigación. Un resumen de las principales ideas para el desarrollo de proyectos de investigación. Universidad Eafit Medellín-Antioquia ESPACIOS URBANOS DE GRANADA USADOS PARA DORMIR POR PSH; 2001.
2. Morales OA. Fundamentos de la Investigación Documental y la Monografía. Manual para la elaboración y presentación de la monografía” Mérida, Facultad de Odontología de la Universidad de Los Andes [Internet]. 2003 [citado 15 de abril de 2015]; Disponible en: <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/16490>
3. Falcato P. Guía de fuentes de información especializadas: humanidades y ciencias sociales. Información, cultura y sociedad [Internet]. diciembre de 2001 [citado 24 de noviembre de 2016];(5):98-100. Disponible en: [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S1851-17402001000200007&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1851-17402001000200007&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
4. Josefa Gallego Lorenzo, Manela Juncà Campdepadrós. Tipología documental. Fundación para la Universitat Oberta de Catalunya; 2010.
5. Chacón B, Winston J, Herrera B, Carlos J, Rodríguez Villabona M. Revisión y análisis documental para estado del arte: una propuesta metodológica desde el contexto de la sistematización de experiencias educativas. Investigación bibliotecológica [Internet]. diciembre de 2013 [citado 15 de abril de 2015];27(61):83-105. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0187-358X2013000300005&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0187-358X2013000300005&lng=es&nrm=iso&tlng=es).
6. Universidad de Alcal. Estrategias de Búsquedas de información [Internet]. Universidad de Alcalá. Biblioteca. [citado 4 de agosto de 2015]. Disponible en: [http://www2.uah.es/bibliotecaformacion/BMED/AlfaBuah/13\\_estrategias\\_de\\_b\\_squeda\\_de\\_informacin.html](http://www2.uah.es/bibliotecaformacion/BMED/AlfaBuah/13_estrategias_de_b_squeda_de_informacin.html)
7. Goncharuk VV. Drinking Water [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2014 [citado 22 de mayo de 2015]. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-04334-0>
8. Programa De Las Naciones Unidas Para El Desarrollo. Informe sobre desarrollo humano. Más allá de la escasez: Poder, pobreza y la crisis mundial del agua [Internet]. Communications Development Incorporated, editor. Nueva York, EE.UU: Mundi-Prensa Libros S.A.; 2006. 440 p. Disponible en:



[http://www.jussempier.org/Inicio/Recursos/Info.%20econ/Resources/HDR06\\_s\\_p\\_complete.pdf](http://www.jussempier.org/Inicio/Recursos/Info.%20econ/Resources/HDR06_s_p_complete.pdf)

9. United Nation. Water for people-water for life: the United Nations world water development report. UNESCO Publ, editor. 2003.
10. Organización Mundial de la salud, UNICEF. Informe de las Naciones Unidas sobre los Recursos Hídricos en el Mundo 2015. Agua para un mundo sostenible: Resumen ejecutivo. New York, EE.UU: World Health Organization and UNICEF; 2015. 80 p.
11. CIRELLI AYP, du Mortier C. Evaluación de la condición del agua para consumo humano en Latinoamérica. En: Blesa MA, Blanco J, editores. Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua Solar Safe Water [Internet]. España; 2005 [citado 16 de abril de 2015]. p. 11-26. Disponible en: [http://horus.psa.es/webesp/projects/solarsafewater/documents/libro/01\\_Capitulo\\_01.pdf](http://horus.psa.es/webesp/projects/solarsafewater/documents/libro/01_Capitulo_01.pdf)
12. UNESCO, WMO, IAEA. Water a shared responsibility; The United Nations World Water Development Report 2. 2006.
13. Ibanez JG, Hernandez-Esparza M, Doria-Serrano C, Fregoso-Infante A. Environmental Chemistry: Fundamentals. Springer Science & Business Media; 2007. 345 p.
14. Blanco J, Malato S. Tecnología de fotocátalisis solar: utilización de la radiación solar para el tratamiento de contaminantes industriales. Instituto de Estudios Almerienses de la Diputación de Almería; 1996. 210 p.
15. OMS OM de la S, Pnuma P de NU para el MA-, Oit OI del T-, Ipcs IP on CS-. Seguridad química: Principios básicos de toxicología aplicada. La naturaleza de los peligros químicos. 1997 [citado 24 de agosto de 2015]; Disponible en: <http://bibliotecavirtual.minam.gob.pe:8080/biam/handle/minam/579>
16. Cásares J. Evaluación analítica y optimización de procesos de oxidación avanzada en planta piloto solar. [Doctoral]. [España]: Universidad de Almería; 2002.
17. Sperling M von. Introducción a la calidad del agua y al tratamiento de aguas residuales. 1.<sup>a</sup> ed. Universidad de Nariño, editor. Vol. 1. Brasil; 2012. 468 p.
18. Gonzalez MA. Análisis de riesgos del tratamiento del agua para calderas. Plaza y Valdes; 1999. 104 p.

19. Apella CM, Araujo ZP. Microbiología del agua. Conceptos Básicos. En: Blesa MA, Blanco J, editores. Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua Solar Safe Water [Internet]. España: M.A. Blesa and J. Blanco; 2005 [citado 16 de abril de 2015]. p. 33-50. Disponible en: [http://horus.psa.es/webesp/projects/solarsafewater/documents/libro/02\\_Capitulo\\_02.pdf](http://horus.psa.es/webesp/projects/solarsafewater/documents/libro/02_Capitulo_02.pdf)
20. Departamento de sanidad del estado de Nueva York. Manual de tratamiento de aguas. 1.<sup>a</sup> ed. Nueva York: Limusa; 2001.
21. Domènech X, Jardim WF, Litter MI. Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. En: Blesa MA, Sanchez B, editores. Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea [Internet]. Madrid: CIEMAT; 2004 [citado 16 de abril de 2015]. p. 1-26. Disponible en: <http://horus.psa.es/webeng/solwater/files/CYTED01/06cap01.pdf>
22. Manahan SE. Introducción a la química ambiental. Reverte; 2006. 788 p.
23. Ikehata K, El-Din MG, Snyder SA. Ozonation and Advanced Oxidation Treatment of Emerging Organic Pollutants in Water and Wastewater. Ozone: Science & Engineering [Internet]. 14 de febrero de 2008 [citado 15 de febrero de 2016];30(1):21-6. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1080/01919510701728970>
24. Glaze WH. Drinking-water treatment with ozone. Environ Sci Technol. marzo de 1987;22:4-30.
25. O'Shea KE, Dionysios D. Advance oxidation processes for water treatment. The Journal of Physical Chemistry Letters [Internet]. 2 de agosto de 2012 [citado 23 de marzo de 2016];3(15):2112-3. Disponible en: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jz300929x>
26. O. Legrini, E. Oliveros, A.M. Braun. Photochemical processes for water treatment. Chem Rev. marzo de 1993;93:671-98.
27. U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA). Handbook on advanced photochemical oxidation processes [Internet]. Washington, DC: Cincinnati, Ohio: Center for Environmental Research Information, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency.; 1998 [citado 4 de enero de 2015]. Disponible en: <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/30004S7Z.PDF?Dockey=30004S7Z.PDF>
28. María de la Menta Ballesteros. Eliminación de plaguicidas no biodegradables en aguas mediante acoplamiento de fotocatálisis solar y oxidación biológica [Doctoral]. [España]: Universidad de Almería; 2008.

29. Teoh WY, Scott JA, Amal R. Progress in Heterogeneous Photocatalysis: From Classical Radical Chemistry to Engineering Nanomaterials and Solar Reactors. *J Phys Chem Lett* [Internet]. 1 de marzo de 2012 [citado 23 de marzo de 2016];3(5):629-39. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1021/jz3000646>
30. Blake DM. Bibliography of work on the heterogeneous photocatalytic removal of hazardous compounds from water and air [Internet]. Vol. 1617. National Renewable Energy Laboratory; 1994 [citado 29 de abril de 2015]. Disponible en: <http://ariaacqua.biz/NREL-31319.pdf>
31. Plataforma Solar de Almería. Aplicación de la energía solar ultravioleta al Tratamiento de la contaminación por compuestos no biodegradables [Internet]. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas; 2005. Disponible en: <http://www.psa.es/webesp/areas/tsa/documentos.php>
32. Herrmann J-M. Water treatment by heterogeneous photocatalysis. *Catalytic Science Series*. 1999;1:171-94.
33. Eisberg RM. Física cuántica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas. México : Limusa; 8 p.
34. Smith WF, Hashemi J. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. Quinta edición. México D.F.: McGraw-Hill; 2006. 758 p.
35. Candal R, Bilmes SA, Blesa MA. Semiconductores con actividad fotocatalítica. En: Sanchez B, Blesa MA, editores. Eliminación de contaminantes por fotocatálisis heterogénea [Internet]. Madrid: CIEMAT; 2004 [citado 16 de abril de 2015]. p. 79-101. Disponible en: <https://www.psa.es/webeng/solwater/files/CYTED01/10cap04.pdf>
36. Van Vlack LH. Tecnología de materiales. México ; Bogotá: Fondo Educativo Interamericano; 1984. 343 p.
37. Gupta SM, Tripathi M. A review of TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Chinese Science Bulletin* [Internet]. junio de 2011 [citado 13 de octubre de 2016];56(16):1639-57. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/s11434-011-4476-1>
38. Reiss H. The Fermi level and the redox potential. *The Journal of Physical Chemistry* [Internet]. 1985 [citado 28 de septiembre de 2016];89(18):3783-91. Disponible en: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/j100264a005>
39. Khan SUM, Kainthla RC, Bockris JOM. The redox potential and the fermi level in solution. *Journal of Physical Chemistry* [Internet]. 1987 [citado 28 de

septiembre de 2016];91(23):5974-7. Disponible en:  
<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/j100307a032>

40. Riepen MR de, Acuña CMC. La química hacia la conquista del Sol. Fondo de Cultura Economica; 2015. 93 p.
41. Rockett A. The Materials Science of Semiconductors. Springer Science & Business Media; 2007. 629 p.
42. Krishnan Rajeshwar. Fundamentals of Semiconductor Electrochemistry and Photoelectrochemistry. En: Encyclopedia of Electrochemistry [Internet]. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2007 [citado 27 de septiembre de 2016]. Disponible en:  
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9783527610426.bard060001/abstract>
43. Kudo A, Miseki Y. Heterogeneous photocatalyst materials for water splitting. Chem Soc Rev [Internet]. 2009 [citado 16 de mayo de 2016];38(1):253-78. Disponible en: <http://xlink.rsc.org/?DOI=B800489G>
44. Kleiman AJ. Crecimiento de películas de dióxido de titanio con un arco catódico: funcionalización de superficies [Internet]. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires; 2011 [citado 26 de mayo de 2016]. Disponible en: [http://digital.bl.fcen.uba.ar/gsd1-282/cgi-bin/library.cgi?a=d&c=tesis&d=Tesis\\_4813\\_Kleiman](http://digital.bl.fcen.uba.ar/gsd1-282/cgi-bin/library.cgi?a=d&c=tesis&d=Tesis_4813_Kleiman)
45. Diebold U. The surface science of titanium dioxide. Surface Science Reports [Internet]. enero de 2003 [citado 26 de mayo de 2016];48(5–8):53-229. Disponible en:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167572902001000>
46. Yamada Y, Kanemitsu Y. Determination of electron and hole lifetimes of rutile and anatase TiO<sub>2</sub> single crystals. Applied Physics Letters. 24 de septiembre de 2012;101(13):133907.
47. Rodríguez J, Candal RJ, Solís J. El fotocatalizador: síntesis, propiedades y limitaciones. En: Blesa MA, Blanco J, editores. Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua Solar Safe Water [Internet]. España; 2005. p. 135-52. Disponible en:  
[http://horus.psa.es/webesp/projects/solarsafewater/documents/libro/09\\_Capitulo\\_09.pdf](http://horus.psa.es/webesp/projects/solarsafewater/documents/libro/09_Capitulo_09.pdf)
48. Candal RJ, Rodríguez J, Colón G, Gelover S, Santos EV, González AJ, et al. Materiales para fotocatálisis y electrofotocatálisis. En: Blesa MA, Sanchez B, editores. Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea [Internet]. Madrid: CIEMAT; 2004 [citado 16 de abril de 2015]. p. 143-63.

- Disponible en:  
[http://www.researchgate.net/profile/Silvia\\_Gelover/publication/264879916\\_7\\_MATERIALES\\_PARA\\_FOTOCATLISIS\\_Y\\_ELECTROFOTOCATLISIS/links/54087b150cf23d9765b3178d.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Silvia_Gelover/publication/264879916_7_MATERIALES_PARA_FOTOCATLISIS_Y_ELECTROFOTOCATLISIS/links/54087b150cf23d9765b3178d.pdf)
49. Marín JM, Restrepo GM, Granda CF. Reactor solar de núcleos fotoactivos. Evaluación en el tratamiento de efluentes gaseosos. Editorial Universidad de Antioquia; 2012. 117 p.
  50. Zhao J, Yang X. Photocatalytic oxidation for indoor air purification: a literature review. Building and Environment [Internet]. mayo de 2003 [citado 19 de mayo de 2016];38(5):645-54. Disponible en:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132302002123>
  51. Henderson MA. A surface science perspective on TiO<sub>2</sub> photocatalysis. Surface Science Reports [Internet]. junio de 2011 [citado 26 de mayo de 2016];66(6-7):185-297. Disponible en:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167572911000100>
  52. Hermann JM. Destrucción de contaminantes orgánicos por fotocátalisis heterogénea. En: Blesa MA, Blanco J, editores. Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua Solar Safe Water [Internet]. España; 2005 [citado 30 de abril de 2015]. p. 153-70. Disponible en:  
[http://horus.psa.es/webesp/projects/solarsafewater/documents/libro/10\\_Capitulo\\_10.pdf](http://horus.psa.es/webesp/projects/solarsafewater/documents/libro/10_Capitulo_10.pdf)
  53. Onal I, Soyer S, Senkan S. Adsorption of water and ammonia on TiO<sub>2</sub>-anatase cluster models. Surface Science [Internet]. junio de 2006 [citado 26 de mayo de 2016];600(12):2457-69. Disponible en:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S003960280600392X>
  54. Bezrodna T, Puchkovska G, Shymanovska V, Baran J, Ratajczak H. IR-analysis of H-bonded H<sub>2</sub>O on the pure TiO<sub>2</sub> surface. Journal of Molecular Structure [Internet]. 20 de agosto de 2004 [citado 20 de noviembre de 2016];700(1-3):175-81. Disponible en:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022286004002078>
  55. Wendt S, Matthiesen J, Schaub R, Vestergaard EK, Lægsgaard E, Besenbacher F, et al. Formation and Splitting of Paired Hydroxyl Groups on Reduced TiO<sub>2</sub> (001). Phys Rev Lett [Internet]. 14 de febrero de 2006 [citado 7 de junio de 2016];96(6):066107. Disponible en:  
<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.96.066107>
  56. Chen X, Liu L, Yu PY, Mao SS. Increasing Solar Absorption for Photocatalysis with Black Hydrogenated Titanium Dioxide Nanocrystals. Science [Internet].

- 11 de febrero de 2011 [citado 16 de abril de 2015];331(6018):746-50. Disponible en: <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1200448>
57. Gaya UI, Abdullah AH. Heterogeneous photocatalytic degradation of organic contaminants over titanium dioxide: A review of fundamentals, progress and problems. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews* [Internet]. marzo de 2008 [citado 19 de mayo de 2016];9(1):1-12. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1389556708000300>
  58. Zhang Y, Payne DT, Pang CL, Fielding HH, Thornton G. Non-Band-Gap Photoexcitation of Hydroxylated TiO<sub>2</sub>. *The Journal of Physical Chemistry Letters* [Internet]. 3 de septiembre de 2015 [citado 2 de junio de 2016];6(17):3391-5. Disponible en: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jpclett.5b01508>
  59. Payne DT, Zhang Y, Pang CL, Fielding HH, Thornton G. Coverage-dependent two-photon photoexcitation at the H<sub>2</sub>O/TiO<sub>2</sub> interface. *Surface Science* [Internet]. marzo de 2016 [citado 26 de mayo de 2016]; Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0039602816000947>
  60. Schneider J, Matsuoka M, Takeuchi M, Zhang J, Horiuchi Y, Anpo M, et al. Understanding TiO<sub>2</sub> Photocatalysis: Mechanisms and Materials. *Chem Rev* [Internet]. 8 de octubre de 2014 [citado 2 de junio de 2016];114(19):9919-86. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1021/cr5001892>
  61. Ohtani B. Titania Photocatalysis beyond Recombination: A Critical Review. *Catalysts* [Internet]. 15 de noviembre de 2013 [citado 2 de junio de 2016];3(4):942-53. Disponible en: <http://www.mdpi.com/2073-4344/3/4/942/>
  62. Deskins NA, Dupuis M. Electron transport via polaron hopping in bulk TiO<sub>2</sub>: A density functional theory characterization. *Phys Rev B* [Internet]. 22 de mayo de 2007 [citado 6 de junio de 2016];75(19):195212. Disponible en: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.75.195212>
  63. Szczepankiewicz SH, Moss JA, Hoffmann MR. Electron Traps and the Stark Effect on Hydroxylated Titania Photocatalysts. *J Phys Chem B* [Internet]. 1 de agosto de 2002 [citado 3 de junio de 2016];106(31):7654-8. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1021/jp020472v>
  64. Hurum DC, Gray KA, Rajh T, Thurnauer MC. Recombination Pathways in the Degussa P25 Formulation of TiO<sub>2</sub>: Surface versus Lattice Mechanisms. *J Phys Chem B* [Internet]. 1 de enero de 2005 [citado 7 de junio de 2016];109(2):977-80. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1021/jp045395d>
  65. Salvador P. On the Nature of Photogenerated Radical Species Active in the Oxidative Degradation of Dissolved Pollutants with TiO<sub>2</sub> Aqueous

Suspensions: A Revision in the Light of the Electronic Structure of Adsorbed Water. *J Phys Chem C* [Internet]. 1 de noviembre de 2007 [citado 5 de junio de 2016];111(45):17038-43. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1021/jp074451i>

66. Cheng J, VandeVondele J, Sprik M. Identifying Trapped Electronic Holes at the Aqueous TiO<sub>2</sub>. *The Journal of Physical Chemistry C* [Internet]. 13 de marzo de 2014 [citado 3 de junio de 2016];118(10):5437-44. Disponible en: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jp500769q>
67. Dubinski AA, Perekhodtsev GD, Poluektov OG, Rajh T, Thurnauer MC. Analytical Treatment of EPR Spectra of Weakly Coupled Spin-Correlated Radical Pairs in Disordered Solids: Application to the Charge-Separated State in TiO<sub>2</sub> Nanoparticles. *J Phys Chem B* [Internet]. 1 de febrero de 2002 [citado 7 de junio de 2016];106(5):938-44. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1021/jp013276h>
68. Dimitrijevic NM, Saponjic ZV, Rabatic BM, Poluektov OG, Rajh T. Effect of Size and Shape of Nanocrystalline TiO<sub>2</sub> on Photogenerated Charges. An EPR Study. *J Phys Chem C* [Internet]. 1 de octubre de 2007 [citado 7 de junio de 2016];111(40):14597-601. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1021/jp0756395>
69. Montoya JF, Bahnemann DW, Peral J, Salvador P. Catalytic Role of TiO<sub>2</sub> Terminal Oxygen Atoms in Liquid-Phase Photocatalytic Reactions: Oxidation of Aromatic Compounds in Anhydrous Acetonitrile. *ChemPhysChem* [Internet]. 4 de agosto de 2014 [citado 6 de junio de 2016];15(11):2311-20. Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cphc.201402043/abstract>
70. Imanishi A, Okamura T, Ohashi N, Nakamura R, Nakato Y. Mechanism of water photooxidation reaction at atomically flat TiO<sub>2</sub> (rutile)(110) and (100) surfaces: Dependence on solution pH. *Journal of the American Chemical Society* [Internet]. 2007 [citado 3 de junio de 2016];129(37):11569-78. Disponible en: <http://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/ja073206+>
71. Bredow T, Jug K. SINDO1 Study of Photocatalytic Formation and Reactions of OH Radicals at Anatase Particles. *J Phys Chem* [Internet]. 1 de enero de 1995 [citado 6 de junio de 2016];99(1):285-91. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1021/j100001a044>
72. Nosaka Y, Komori S, Yawata K, Hirakawa T, Nosaka AY. Photocatalytic <sup>•</sup>OH radical formation in TiO<sub>2</sub> aqueous suspension studied by several detection methods. *Phys Chem Chem Phys* [Internet]. 2 de octubre de 2003 [citado 6 de junio de 2016];5(20):4731-5. Disponible en: <http://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2003/cp/b307433a>
73. Grela MA, Loeb B, Restrepo GM, Lagorio MG, San Román E. Los mecanismos de destrucción de contaminantes orgánicos. En: Blesa MA,

- Sanchez B, editores. Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea [Internet]. Madrid: CIEMAT; 2004 [citado 16 de abril de 2015]. p. 103-19. Disponible en: <https://www.psa.es/webeng/solwater/files/CYTED01/11cap05.pdf>
74. Ramírez Noreña A. Degradación de resorcinol por foto-fenton (UV/Fe+2/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) [Internet]. [Pereira]: Universidad Tecnológica de Pereira; 2010 [citado 28 de marzo de 2016]. Disponible en: <http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/dspace/handle/11059/1789>
  75. Arias Ortiz DL, Pizza Londoño VE. Evaluación de la degradación del ácido 3,5-dinitrosalicílico mediante fotocatálisis homogénea en un reactor de recirculación y reactor solar CPC de la escuela de química de la Universidad Tecnológica de Pereira. [Pereira]: Universidad Tecnológica de Pereira; 2014.
  76. KLAMERTH N. Application of a Solar Photo-Fenton for the Treatment of Contaminants in Municipal Wastewater Effluents. 2011;
  77. Malato S. Procedimientos para la evaluación de la degradación de contaminantes en agua mediante TAOs. En: Blesa MA, Blanco J, editores. Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua Solar Safe Water [Internet]. España; 2005 [citado 16 de abril de 2015]. p. 171-88. Disponible en: [http://horus.psa.es/webesp/projects/solarsafewater/documents/libro/11\\_Capitulo\\_11.pdf](http://horus.psa.es/webesp/projects/solarsafewater/documents/libro/11_Capitulo_11.pdf)
  78. Sánchez MÁS, Gisbert EV. Técnicas analíticas de contaminantes químicos: Aplicaciones toxicológicas, medioambientales y alimentarias. Ediciones Díaz de Santos S.A.; 2004. 324 p.
  79. Maldonado MI. Descontaminación de aguas de lavado de envases de plaguicidas mediante fotocatálisis solar [Internet] [Tesis Doctoral]. Universidad de Almería; 2000 [citado 1 de enero de 2014]. Disponible en: [https://www.psa.es/webesp/areas/tsa/docs/Tesis\\_Manuel\\_I\\_Maldonado.pdf](https://www.psa.es/webesp/areas/tsa/docs/Tesis_Manuel_I_Maldonado.pdf)
  80. Gálvez JB, Rodríguez SM, Gasca CAE, Bandala ER, Gelover S, Leal T. Purificación de aguas por fotocatálisis heterogénea: estado del arte. En: Blesa MA, Sanchez B, editores. Eliminación de contaminantes por fotocatálisis heterogénea [Internet]. Madrid: CIEMAT; 2004 [citado 16 de abril de 2015]. p. 51-76. Disponible en: <http://horus.psa.es/webeng/solwater/files/CYTED01/08cap03.pdf>
  81. Marqués RS, Moreto FV. El agua en el medio ambiente: muestreo y análisis. Plaza y Valdes; 2003. 220 p.



82. Pino Pérez O, Jorge Lazo F. Ensayo de artemia: útil herramienta de trabajo para ecotoxicólogos y químicos de productos naturales. *Revista de Protección Vegetal* [Internet]. 2010 [citado 23 de noviembre de 2016];25(1):34-43. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1010-27522010000100008&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1010-27522010000100008&script=sci_arttext&tlng=pt)
83. Sánchez L, Neira A. Bioensayo general de letalidad en *Artemia salina*, a las fracciones del extracto etanólico de *Psidium Guajava*. L y *Psidium Guineense*. *sw. Cultura Científica* [Internet]. 2011 [citado 23 de noviembre de 2016];3(3):40-5. Disponible en: <http://www.revistasjdc.com/main/index.php/ccient/article/view/76/0>
84. Maldonado MI. Descontaminación de aguas de lavado de envases de plaguicidas mediante fotocatalisis solar [Doctoral]. [España]: Universidad de Almería; 2000.
85. Shriner RL, Hermann CKF, Terence C. Morrill, Curtin DY, Reynold C. Fuson. Identificación sistemática de compuestos orgánicos. 2a ed. México: Limusa Wiley; 2013.
86. Perfetti del Corral JJ, Balcázar A, Hernández Gamarra A, editores. Políticas para el desarrollo de la agricultura en Colombia. 1. ed. Bogotá: Fedesarrollo; 2013. 233 p.
87. ANALISIS DE PESTICIDAS POR CROMATOGRAFIA DE GAS Un modelo operacional. Univ. Nacional de Colombia; 2006. 218 p.
88. MacBean C, British Crop Protection Council, editores. The pesticide manual: a world compendium. 16.<sup>a</sup> ed. Alton, Hampshire: British Crop Protection Council; 2012. 1439 p.
89. Escudero García JÁ. Regeneración de aguas contaminadas por plaguicidas (sustancias prioritarias y preferentes), con elevado potencial de lixiviación, mediante fotocátalisis solar heterogénea. [Internet] [Doctoral]. [España]: Universidad Murcia; 2015 [citado 9 de septiembre de 2016]. Disponible en: <https://digitum.um.es/xmlui/handle/10201/45819>
90. Garrido Martín I. Aplicación de técnicas de remediación (fotocátalisis heterogénea y solarización) para minimizar la presencia de residuos de insecticidas en agua y suelo [Internet] [Doctoral]. [España]: Universidad Murcia; 2016 [citado 9 de septiembre de 2016]. Disponible en: <https://digitum.um.es/jspui/handle/10201/49539>
91. Rodríguez SM, Gálvez JB, Gasca CAE, Bandala ER. Degradación de Plaguicidas. En: Blesa MA, Sanchez B, editores. Eliminación de Contaminantes por Fotocátalisis Heterogénea [Internet]. Madrid: CIEMAT;

2004 [citado 16 de abril de 2015]. p. 331-49. Disponible en: <http://www.msal.gov.ar/agroquimicos/pdf/Degradacion-de-plaguicidas-CNEA.pdf>

92. Superintendencia de Sociedades. Desempeño del sector textil confección 2008-2012 informe [Internet]. 2013 [citado 17 de noviembre de 2016]. Disponible en: <http://www.supersociedades.gov.co/asuntos-economicos-y-contables/estudios-y-supervision-por-riesgos/estudios-economicos-y-financieros/Documents/Sectores%20Economicos/Informe-Sector-Textil-Oct152013.pdf>
93. Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente - DAMA. Guía ambiental para el sector textil. Cámara de Comercio de Bogotá; 2004.
94. George T. Austin. Manual de procesos químicos en la industria. 5.<sup>a</sup> ed. Vol. III. México: McGRAW-HILL; 1988.
95. Pey Clemente J. Aplicación de procesos de oxidación avanzada (Fotocatálisis solar) para el tratamiento y reutilización de efluentes textiles [Internet]. 2008 [citado 17 de noviembre de 2016]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/2241>
96. Guimarães JR, Ibáñez J, Litter MI, Pizarro R. Desinfección de agua. En: Blesa MA, Sanchez B, editores. Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea [Internet]. Madrid: CIEMAT; 2004 [citado 16 de abril de 2015]. p. 305-16. Disponible en: <http://www.psa.es/webeng/solwater/files/CYTED01/22cap15.pdf>
97. Hernández Molano A. Evaluación de fotocatálisis heterogénea con  $\text{TiO}_2$  proceso fenton para el control de salmonella spp en aguas generadas en plantas de beneficio avícola [Internet]. 2012 [citado 24 de noviembre de 2016]. Disponible en: <http://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/15454>
98. Reinos Osorio PA. Degradación de resorcinol por Fotocatálisis Heterogénea mediada por  $\text{TiO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$ . [Pereira]: Universidad Tecnológica de Pereira; 2009.
99. Soto Arenas CA, López Flórez GA. Degradación fotocatalítica de la fluoresceína [Internet]. [Pereira]: Universidad Tecnológica de Pereira; 2009 [citado 28 de marzo de 2016]. Disponible en: <http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/dspace/handle/11059/1786>
100. Laina Agudelo JM. Degradación de la fluoresceína sódica por Fotocatálisis Heterogénea en un reactor heliofotocatalítico. [Pereira]: Universidad Tecnológica de Pereira; 2010.

101. Velásquez Salas JD. Degradación de 1-hidroxi-4-metilbenceno mediante fotocátalisis heterogénea en un reactor heliofotocatalítico [Internet]. [Pereira]: Universidad Tecnológica de Pereira; 2011 [citado 28 de marzo de 2016]. Disponible en: <http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/dspace/handle/11059/1797>
102. Carvajal Gómez AM, Jimenez Coqueco LJ. Evaluación de la degradación por fotocátalisis heterogénea en un reactor artesanal y heliofotocatalítico del ácido 3, 5-dinitrosalicílico [Internet]. 2012 [citado 28 de marzo de 2016]. Disponible en: <http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/dspace/handle/11059/2937>
103. Cruz Betancurt E, Torijano Mina JM. Degradación por fotocátalisis homogénea en reactor artesanal y heliofotocatalítico del 1-hidroxi-4-metilbenceno [Internet]. [Pereira]: Universidad Tecnológica de Pereira; 2014 [citado 12 de agosto de 2016]. Disponible en: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/4930>
104. Peñaloza MA, Tobón Carvajal YA. Evaluación de la degradación del colorante amarillo reactivo, útil en la industria textil por fotodegradación con métodos comparativo entre catálisis heterogénea (TiO<sub>2</sub>) y homogénea (foto-fenton). [Pereira]: Universidad Tecnológica de Pereira; 2014.
105. Baicue JS. Degradación del azul de metileno y verde de malaquita por fotocátalisis heterogénea utilizando dióxido de titanio dopado con nitrógeno (N-TiO<sub>2</sub>) bajo luz visible. [Pereira]: Universidad Tecnológica de Pereira; 2015.
106. Galvis DP, Osorio L. Evaluación de la degradación de una mezcla de colorantes residuales originados en el laboratorio de Química Orgánica II de la Escuela de Química de la Universidad Tecnológica de Pereira mediante fotocátalisis homogénea ( Foto-Fenton) utilizando un reactor solar. [Pereira]: Universidad Tecnológica de Pereira; 2015.
107. Hernández N, Ramírez Y. Evaluación de la fotodegradación del colorante Naranja II reutilizando sulfuro de cadmio (CdS) obtenido como residuo. [Pereira]: Universidad Tecnológica de Pereira; 2015.
108. Cárdenas GY. Degradación del colorante Novacrón Red LS-BN presente en el agua residual del proceso de tinción mediante fotocátalisis heterogénea con el catalizador soportado sobre vidrio en un reactor fotocatalítico. [Pereira]: Universidad Tecnológica de Pereira; 2015.